



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ – REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO E MEIO
AMBIENTE
DOUTORADO EM ASSOCIAÇÃO PLENA EM DESENVOLVIMENTO E MEIO
AMBIENTE



MARCELO MACHADO CUNHA

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA EMBARCADO PARA REALIZAÇÃO DE
MANEJO DE IRRIGAÇÃO

SÃO CRISTÓVÃO / SE

2019

MARCELO MACHADO CUNHA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA EMBARCADO PARA REALIZAÇÃO DE
MANEJO DE IRRIGAÇÃO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Desenvolvimento e Meio Ambiente pela Universidade Federal de Sergipe.

Orientador: DSc. Gregorio Guirado Faccioli

SÃO CRISTÓVÃO / SE

2019

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE**

C972d Cunha, Marcelo Machado
Desenvolvimento de um sistema embarcado para
realização de manejo de irrigação / Marcelo Machado Cunha;
orientador Gregorio Guirado Faccioli. – São Cristóvão, SE,
2019.
148 f. : il.

Tese (doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) -
Universidade Federal de Sergipe, 2019.

1. Meio ambiente. 2. Automação. 3. Desenvolvimento de
Recursos hídricos. 3. Eficiência organizacional. 4. Irrigação. I.
Faccioli, Gregorio Guirado, orient. III. Título.


CDU: 502:004.9


MARCELO MACHADO CUNHA


**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA EMBARCADO PARA REALIZAÇÃO DE
MANEJO DE IRRIGAÇÃO**


Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente,
como requisito final para obtenção do título em Doutor em Desenvolvimento e Meio Ambiente
pela Universidade Federal de Sergipe.


Aprovado em 07 de fevereiro de 2019.

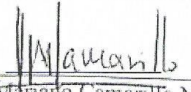

Dr. Gregório Guirado Faccioli
Universidade Federal de Sergipe
Orientador


Dr. Roberto Rodrigues de Souza
Universidade Federal de Sergipe
Examinador Interno


Dr. Inajá Francisco de Sousa
Universidade Federal de Sergipe
Examinador Interno


André Quintão de Almeida
Universidade Federal de Sergipe
Examinador Interno


Dr. Edson Barbosa Lisboa
Instituto Federal de Sergipe
Examinador Externo


Dr. Juan Mariano Camarillo Naranjo
Universidade de Sevilla
Examinador Externo

São Cristóvão – SE
2019

Este exemplar corresponde à versão da Tese de Doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente concluído no Programa em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA) da Universidade Federal de Sergipe (UFS).

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Dr. Gregório Guirado Faccioli', is written over a horizontal line.

Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente - PRODEMA
Universidade Federal de Sergipe

É concedido ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA) da Universidade Federal de Sergipe (UFS) responsável pelo Curso de Doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente permissão para disponibilizar, reproduzir cópia desta Tese e emprestar ou vender tais cópias.



Marcelo Machado Cunha

Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente - PRODEMA
Universidade Federal de Sergipe



Dr. Gregorio Guirado Faccioli

Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente - PRODEMA
Universidade Federal de Sergipe

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela graça concedida de viver em saúde e paz, pela família que me concedeu e pelos amigos que colocou no meu caminho.

A minha esposa Simone, pela ajuda e incentivo nas horas difíceis desta jornada.

As minhas filhas, Maria Gabriela e Maria Sofia, pelo carinho que traz a nossa família, passando alegria e forças para vencer os desafios.

Aos meus pais e irmãs, por acompanharem e torcerem por esse importante passo da minha vida profissional.

Ao meu caríssimo orientador, prof. Gregorio Guirado Faccioli, pela dedicação, paciência, sempre disposto a ouvir e ajudar.

Aos funcionários do Campus Rural pelo apoio durante o período em que passei desenvolvendo a pesquisa.

Aos professores da banca por terem realizado substanciais contribuições para minha Tese.

Aos professores do PRODEMA e PRORH pelas contribuições científicas.

Aos colegas de doutorado por sempre estarem dispostos a colaborar.

Enfim, agradeço a todos que contribuíram para a execução deste trabalho, reconheço calorosamente o apoio.

RESUMO

O manejo de irrigação é um dos principais fatores que afetam o desenvolvimento das culturas, visto que estas são sensíveis tanto ao déficit quanto ao excesso de água. Uma vez que a agricultura irrigada tem sido responsável por grande parcela da água doce consumida no planeta, torna-se necessária a implantação de sistemas de irrigação eficientes e a utilização de métodos precisos que quantifiquem as necessidades hídricas das culturas para que não ocorra desperdício. Irrigar de forma adequada favorece a redução do uso da água e da energia elétrica e resulta em uma menor incidência de doenças, já que a maioria dos agricultores brasileiros utilizam a irrigação de forma excessiva. Além disso, o manejo está associado à preservação do meio ambiente, permitindo benefícios sustentáveis à agricultura irrigada. Diante desse contexto, o presente trabalho objetivou desenvolver um sistema embarcado para tomada de decisão em processos de irrigação, visando a economia dos recursos hídricos e de energia elétrica. Para isso foi projetada e desenvolvida uma estação meteorológica automática composta pelos cinco sensores necessários para o cálculo da demanda hídrica (velocidade do vento, precipitação, irradiância solar, temperatura e umidade relativa do ar), utilizou-se o método de Penman-Monteith para a estimativa da evapotranspiração de referência. Após o desenvolvimento do equipamento, realizou-se a calibração dos sensores, encontrando coeficientes de determinação (R^2) de 0,965; 0,989; 0,989; 0,990, para os sensores de radiação solar, temperatura, umidade relativa e velocidade do vento respectivamente. Para precipitação encontrou-se um erro máximo de 5% considerado satisfatório. Em seguida, avaliou-se o equipamento no tocante a sua funcionalidade em calcular a evapotranspiração da cultura e o gerenciamento do sistema de irrigação. O sistema embarcado mostrou ser confiável e eficiente, de forma que não foram encontrados problemas. O custo do equipamento desenvolvido ficou em torno de \$ 270, o que corresponde a 7% do valor de uma estação meteorológica automática, possibilitando a sua aquisição por agricultores de baixa renda, como é o caso dos agricultores do Perímetro Irrigado Porção da Ribeira. Estes agricultores foram capacitados quanto ao uso dessa tecnologia e 87% tiveram interesse em utilizar o sistema proposto.

Palavras-chave: Automação. Demanda hídrica. Eficiência.

ABSTRACT

Irrigation management is one of the main factors affecting the development of crops, since they are sensitive to both the deficit and excess water. Since irrigated agriculture has been responsible for a large share of the freshwater consumed on the planet, efficient irrigation systems and the use of accurate methods are needed to quantify the water needs of crops so that there is no waste. Irrigating properly favors the reduction of water and electricity use and results in a lower incidence of diseases, since most Brazilian farmers use irrigation excessively. In addition, management is associated with preservation of the environment, allowing sustainable benefits to irrigated agriculture. Given this context, the present work aimed to develop an embedded system for decision making in irrigation processes, aiming at the economics of water resources and electric energy. For this, an automatic meteorological station composed of the five sensors required to calculate the water demand (wind velocity, precipitation, solar irradiance, temperature and relative humidity) was designed and developed, the Penman-Monteith method was used estimation of reference evapotranspiration. After the development of the equipment, the calibration of the sensors was performed, finding determination coefficients (R^2) of 0.965; 0.989; 0.989; 0.990, for solar radiation sensors, temperature, relative humidity and wind speed, respectively. For precipitation, a maximum error of 5% was found to be satisfactory. Next, the equipment was evaluated for its functionality in calculating the evapotranspiration of the crop and the management of the irrigation system. The embedded system proved to be reliable and efficient, so no problems were found. The cost of the equipment developed was around \$ 270, which corresponds to 7% of the value of an automatic weather station, allowing its acquisition by low-income farmers, as is the case of the farmers in the Irrigated Perimeter of Ribeira. These farmers were trained in the use of this technology and 87% were interested in using the proposed system.

Keywords: Automation. Water demand. Efficiency.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Laboratório de eletrônica digital do IFS – Fase 1 da pesquisa	51
Figura 2- Casa de Vegetação da UFS – Fase 1 da pesquisa.....	52
Figura 3 - Campus Rural da UFS em São Cristóvão – Fase 2 da pesquisa.....	53
Figura 4 - Porção da Ribeira (Itabaiana-SE) – Fase 3 da pesquisa	54
Figura 5 - Barragem de terra no rio Traíras.....	55
Figura 6 - Cultura sendo irrigada por microaspersão	55
Figura 7 – Página WEB do sistema.....	57
Figura 8 – Página WEB para consulta dos dados.....	57
Figura 9 – Arquitetura do sistema proposto	58
Figura 10 – Fluxograma de leitura das variáveis meteorológicas	59
Figura 11 – Fontes de alimentação AC/DC do Raspberry e do microcontrolador arduino.....	60
Figura 12 – Fluxograma do provimento de energia através do painel solar	61
Figura 13 – Circuito condicionador de sinais do painel solar e da bateria.....	61
Figura 14 - Caçambas basculantes	62
Figura 15 - Mecanismo de balança do pluviógrafo	62
Figura 16 - Calibração das balanças utilizando uma pipeta graduada.....	64
Figura 17 - Pluviógrafo desenvolvido	65
Figura 18 - Corpo de piranômetro desenvolvido utilizando camuflador de câmera de segurança.....	67
Figura 19 - Corpo de piranômetro desenvolvido utilizando luva para eletrodutos de rede elétrica.....	68
Figura 20 - Circuito condicionador de sinal utilizado no piranômetro	68
Figura 21 - Plafon utilizado para confecção do abrigo meteorológico	71
Figura 22 - Abrigo meteorológico desenvolvido para proteção dos sensores	71
Figura 23 - Filtro poroso e sensor SHT21	72
Figura 24 - Vista de cima do suporte com as três hastes.....	73
Figura 25 - Concha com parafuso de fixação e suporte em nylon	74
Figura 26 - Eixo do anemômetro.....	74
Figura 27 - Corpo do anemômetro confeccionado em nylon	75
Figura 28 – Anemômetro desenvolvido	76
Figura 29 – Fluxograma do sistema de irrigação	81
Figura 30 - Estação meteorológica instalada no Campus Rural da UFS.....	83
Figura 31 - Aplicação da grade aradora, incorporação do esterco bovino e levantamento dos canteiros.	86
Figura 32 - Representação das parcelas do experimento	86
Figura 33 - Hidrômetros instalados para medição do volume de água aplicada por cada parcela do experimento.....	87
Figura 34 - Coentro semeado nos canteiros no dia 07 de março de 2018.	88
Figura 35 - Coentro com 16 dias de semeadura, início da diferenciação da irrigação.....	88
Figura 36 - Coentro no dia da colheita.....	90
Figura 37 - Colheita do coentro.....	90
Figura 38 - Canteiros após a colheita para avaliações de massa fresca e seca	91
Figura 39 – Pesagem da massa fresca do coentro	92
Figura 40 - Secagem do coentro em estufa e pesagem da massa seca	92
Figura 41 - Diagrama de dispersão da Radiação Solar Sensor Padrão e Protótipo 1 – Fase 1.....	95
Figura 42 - Diagrama de dispersão da Radiação Solar Sensor Padrão e Protótipo 1 sem o intercepto – Fase 1	96
Figura 43 - Diagrama de dispersão da Radiação Solar Sensor Padrão e Protótipo 2 – Fase 1.....	96
Figura 44 - Diagrama de dispersão da Radiação Solar Sensor Padrão e Protótipo 2 sem o intercepto – Fase 1	97
Figura 45 - Diagrama de dispersão da Radiação Solar Sensor Padrão e Protótipo 1 – Fase 2.....	98
Figura 46 - Diagrama de dispersão da Radiação Solar Sensor Padrão e Protótipo 1 sem o intercepto – Fase 2	98
Figura 47 - Diagrama de dispersão da Radiação Solar Sensor Padrão e Protótipo 2 – Fase 2.....	99
Figura 48 - Diagrama de dispersão da Radiação Solar Sensor Padrão e Protótipo 2 sem o intercepto –	

Fase 2	99
Figura 49 - Diagrama de dispersão da Temperatura Sensor Padrão e Protótipo	101
Figura 50 - Diagrama de dispersão da Umidade Relativa do Sensor Padrão e Protótipo	102
Figura 51 - Diagrama de dispersão da Velocidade do Vento Sensor Padrão e Protótipo	104
Figura 52 - Diagrama de dispersão da Radiação solar INMET e Protótipo sem o intercepto.....	107
Figura 53 - Diagrama de dispersão da Radiação solar INMET e Protótipo.....	108
Figura 54 - Comparação dos valores diários de temperatura do ar	108
Figura 55 - Comparação dos valores diários de umidade relativa do ar	109
Figura 56 - Comparação dos valores diários da velocidade do vento	109
Figura 57 - Comparação dos valores diários do volume de chuva.....	110
Figura 58 - Tabela de Irrigação das culturas do Campus Rural – UFS	118
Figura 59 – Coentro colhido com 38 dias após a semeadura	120
Figura 60 – Capacitação dos agricultores do Perímetro Irrigado Porção da Ribeira	122
Figura 61 – Participação dos agricultores nas atividades educativas	123
Figura 62 – Quantidade de agricultores que estão dispostos a utilizar o sistema desenvolvido	123
Figura 63 – Índices das culturas cultivadas pelos agricultores capacitados.....	125

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coeficientes de cultura (K_c) para o cálculo da evapotranspiração da cultura, conforme hortaliça e estágio de desenvolvimento das plantas	29
Tabela 2 - Coeficiente da cultura (K_c) em função do seu estágio de desenvolvimento	30
Tabela 3 - Constante psicométrica (γ) para diferentes altitudes (z)	80
Tabela 4 - Coeficientes de cultura (K_c) para a alface conforme estágio de desenvolvimento da planta	84
Tabela 5 - Resultado da amostra do solo do campus Rural.....	85
Tabela 6 - Valores do Coeficiente da Cultura (K_c) para cada estágio do desenvolvimento do coentro.	89
Tabela 7 - Identificação das parcelas, canteiros e linhas de coentro utilizados na amostra	91
Tabela 8 - Valores do índice de desempenho para critérios de avaliação do desempenho do modelo .	94
Tabela 9 – Comparação estatística dos dois corpos de instrumentos desenvolvidos	100
Tabela 10 – Valores estatísticos da temperatura e umidade relativa.....	103
Tabela 11 - Temperatura Máxima ($T_{m\acute{a}x}$), Temperatura Mínima ($T_{m\acute{i}n}$), Umidade Relativa Máxima ($U_{m\acute{a}x}$), Umidade Relativa Mínima ($U_{m\acute{i}n}$), Velocidade do Vento a 2 metros de altura (U_2) e Radiação Solar (R_s) para cada dia do experimento da alface.	111
Tabela 12 - Valores da Evapotranspiração de Referência (E_{To}), Evapotranspiração da Cultura (E_{Tc}), Coeficiente da Cultura (K_c), Volume de Chuva e o Tempo de irrigação para cada dia do experimento da alface.	113
Tabela 13 – Temperatura Máxima ($T_{m\acute{a}x}$), Temperatura Mínima ($T_{m\acute{i}n}$), Umidade Relativa Máxima ($U_{m\acute{a}x}$), Umidade Relativa Mínima ($U_{m\acute{i}n}$), Velocidade do Vento a 2 metros de altura (U_2) e Radiação Solar (R_s) para cada dia do experimento do coentro.....	115
Tabela 14 - Valores da Evapotranspiração de Referência (E_{To}), Evapotranspiração da Cultura (E_{Tc}), Coeficiente da Cultura (K_c), Volume de Chuva e o Tempo de irrigação para cada dia do experimento do coentro.....	115
Tabela 15 - Dias de irrigação do experimento do coentro e o volume de água aplicado por parcela.	116
Tabela 16 – Resumo da análise de variância para massa fresca.....	120
Tabela 17 – Resultados da análise de variância para massa fresca	121
Tabela 18 – Teste de Tukey para massa fresca	121
Tabela 19 - Resumo da análise de variância para massa seca.....	121
Tabela 20 - Resultados da análise de variância para massa seca	121
Tabela 21 - Teste de Tukey para massa seca.....	121

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Procedimentos presentes em cada fase do projeto e seus respectivos locais.....	56
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Área
AC/DC	Corrente Alternada / Corrente Contínua
arccos	Arco Cosseno
c	Índice de desempenho
CO ₂	Dióxido de carbono
cos	Cosseno
CLP	Controlador lógico programável
d	Índice de concordância de Willmott
DPV	Déficit de pressão de vapor
dr	Distância relativa terra sol
ea	Pressão de vapor atual
EPE	Erro padrão da estimativa
EPEA	Erro padrão da estimativa ajustado
EPEAcc	Erro padrão da estimativa ajustado em relação a regressão linear completa
EPEAco	Erro padrão da estimativa ajustado em relação a regressão linear forçada pela origem
es	Pressão de saturação de vapor
ET	Evapotranspiração
ETc	Evapotranspiração da cultura
ETo	Evapotranspiração de referência
exp	Exponencial
FAO	Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação
G	Fluxo de calor no solo
GND	Terra
G _{sc}	Constante solar
ICID	Comissão Internacional de Irrigação e Drenagem

J	Dia Juliano
Kc	Coeficiente da cultura
N	Duração máxima possível da luz do dia
n	Duração real da luz do dia
OMM	Organização Mundial de Meteorologia
ONU	Organização das Nações Unidas
P	Precipitação
R ²	Coeficiente de determinação
r	Coeficiente de correlação
Ra	Radiação no topo da atmosfera
Rn	Radiação líquida à superfície da cultura
Rnl	Saldo de radiação de ondas longas
Rns	Saldo de radiação de ondas curtas
Rs	Radiação solar
Rso	Radiação solar em dias de céu claro
RTC	Relógio de tempo real
sen	Seno
T	Temperatura média do ar
tg	Tangente
Tmáx	Temperatura máxima em Celsius
Tmín	Temperatura mínima em Celsius
Tmáxk	Temperatura máxima em Kelvin
TmínK	Temperatura mínima em Kelvin
U2	Velocidade do vento a dois metros de altura
URmáx	Umidade relativa máxima do ar
URmín	Umidade relativa mínima do ar

V	Volume
ω_s	Ângulo horário ao pôr do sol
z	Elevação em metros da estação meteorológica sobre o nível do mar
α	Albedo ou coeficiente de reflexão
σ	Constante de Stefan-Boltzman
φ	Latitude em radianos
δ	Declinação solar
γ	Constante psicométrica
π	Pi
Δ	Declividade da curva de pressão de saturação de vapor

LISTA DE SÍMBOLOS

°C	Grau Celsius
cm	Centímetro
cm ²	Centímetro quadrado
h	Hora
ha	Hectare
KHz	Quilo hertz
km	Quilômetro
Km.dia ⁻¹	Quilômetros por dia
kPa	Quilo pascal
kPa °C ⁻¹	Quilo pascal por Grau Celsius
m	Metro
MJh ⁻¹	Megajoule por hora
MJ.m ⁻²	Megajoule por metro quadrado
MJ.m ⁻² .dia ⁻¹	Megajoule por metro quadrado dia
ml	Mililitro
mm	Milímetro
mm. dia ⁻¹	Milímetro por dia
mm.h ⁻¹	Milímetro por hora
mm.m ⁻²	Milímetro por metro quadrado
m.s ⁻¹	Metros por segundo
mV	milivolts
nm	Nanômetro
V	Volts
Wm ⁻²	Watts por metro quadrado
%	Percentual

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	21
2.1 Desenvolvimento Sustentável	21
2.2 Recursos Hídricos e Agricultura Irrigada	24
2.3 Demanda Hídrica.....	27
2.4 Estações Meteorológicas.....	30
2.4.1 Radiação Solar.....	32
2.4.2 Temperatura do ar.....	33
2.4.3 Umidade relativa do ar	35
2.4.4 Abrigos Meteorológicos	37
2.4.5 Velocidade do Vento	37
2.4.6 Precipitação Pluviométrica	38
2.5 Sistemas e manejo de irrigação	40
2.5.1 Irrigação por aspersão.....	41
2.5.2 Irrigação Localizada	44
2.6 Um breve estado da arte de sistemas de irrigação automatizados.....	46
2.7 Perímetro Irrigado Porção da Ribeira	49
3 METODOLOGIA.....	51
3.1 Delimitação e caracterização da área de estudo	51
3.2 Métodos e técnicas	56
3.2.1 Desenvolvimento da estação meteorológica automática	56
3.2.1.1 Pluviógrafo	61
3.2.1.2 Piranômetro	66
3.2.1.3 Termômetro e Higrômetro.....	70
3.2.1.4 Anemômetro	73
3.2.2 Cálculo da Necessidade Hídrica	77
3.2.3 Testes e aplicação do sistema de irrigação	82
3.2.3.1 Instalação e avaliação da coleta de dados meteorológicos	82
3.2.3.2 Avaliação do Sistema de Irrigação com uma cultura hipotética	84
3.2.3.3 Avaliação do Sistema de Irrigação com a cultura do coentro	85
3.2.4 Conscientização dos agricultores do perímetro irrigado Porção da Ribeira quanto a importância da realização do manejo de irrigação.	93
4 ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS	94
4.1 Calibração da Estação Meteorológica	94
4.1.1 Piranômetro	95

4.1.2 Termômetro e Higrômetro.....	101
4.1.3 Anemômetro	103
4.1.4 Pluviógrafo	105
4.2 Avaliação dos dados meteorológicos coletados no Campus Rural da UFS	106
4.3 Avaliação do sistema automático de irrigação com uma cultura hipotética.....	110
4.4 Avaliação do sistema automático de irrigação com a cultura do coentro	114
4.5 Capacitação dos agricultores do Perímetro Irrigado Porção da Ribeira.....	122
5 CONCLUSÕES.....	126
6 REFERÊNCIAS	129
APÊNDICE A – ROTINA COMPUTACIONAL PARA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA, DEFINIÇÃO DO COEFICIENTE DA CULTURA, CÁLCULO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CULTURA E TEMPO DE IRRIGAÇÃO	137
APÊNDICE B – ROTINA COMPUTACIONAL PARA LEITURA DAS VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS E GERENCIAMENTO DO SISTEMA DE IRRIGAÇÃO.	141
APÊNDICE C – ROTINA COMPUTACIONAL PARA GRAVAÇÃO DOS DADOS METEOROLÓGICOS NA BASE DE DADOS.....	146
APÊNDICE D – CORTES DO ANEMÔMETRO CONFECCIONADO	147

1 INTRODUÇÃO

A água constitui um elemento vital para o abastecimento humano, bem como para o desenvolvimento de atividades industriais e agrícolas, sendo de importância extrema para os ecossistemas. A Terra tem 75% de água em sua composição, entretanto somente 0,45% estão na forma de água doce disponível para consumo em rios e lagos (Jesus e Souza, 2013).

O estado de Sergipe conta com diversos perímetros irrigados. Tem como destaque na região agreste do estado, o perímetro irrigado Porção da Ribeira que fornece hortaliças como batata doce, coentro, alface, cebolinha, pimentão, quiabo, tomate, couve, entre outros, para comercialização em supermercados, feiras livres da capital e do interior.

A implantação de perímetros irrigados objetiva aumentar a oferta de alimentos e matérias-primas e também maior autonomia em relação ao regime pluvial, diversificação da produção, além de propiciar melhores condições sociais e econômicas. Porém, os sistemas de irrigação em operação nem sempre são manejados adequadamente, não realizando um controle efetivo sobre a quantidade de água e a uniformidade da rega em função das necessidades hídricas das culturas. Ora irriga em demasia, acarretando gastos desnecessários de grandes volumes de água e energia elétrica, o que constitui desperdício de recursos e despesas evitáveis; ora de forma deficitária, acarretando queda na produção.

A agricultura irrigada praticada no perímetro irrigado Porção da Ribeira tem apresentado aspectos positivos e negativos, no que se refere a economia e questões sociais. Os positivos estão associados à maior oferta de empregos, aumento da produção de alimentos e na renda média dos produtores, proporcionando melhores condições de vida à população. Quanto aos aspectos negativos destacam-se a crescente demanda hídrica da agricultura irrigada e o aumento do consumo de energia elétrica, itens conflitantes com a manutenção do equilíbrio ambiental.

Quando agregam-se as características de cada cultura e o tipo de irrigação utilizada é possível estabelecer um sistema de controle para a reposição da água evapotranspirada, estimando desta forma a lâmina d'água necessária para o melhor desenvolvimento da cultura.

A agricultura irrigada no perímetro irrigado Porção da Ribeira não apresenta um controle efetivo no tocante à quantidade de água a ser repostada ao solo para o desenvolvimento adequado das culturas. Os agricultores da região irrigam em demasia o que gera gastos desnecessários de grandes volumes de água e energia elétrica. Isso se dá devido ao medo de baixas na produtividade ocasionadas pelo estresse hídrico das plantas. Esse excesso pode

comprometer a produção, pela lixiviação de nutrientes e desenvolvimento de microclima favorável ao surgimento de doenças.

Todo o processo de cultivo é realizado a partir da vivência e tradição familiar dos agricultores, que usam conhecimentos do senso comum para melhor produzir, e sem consciência dos danos causados ao meio ambiente em função da falta de informação científica.

A dificuldade dos agricultores é a definição de quando e quanto de água aplicar, ou seja, saber o momento certo de iniciar a irrigação e quanto de água deve ser aplicada. Tudo isso ocorre pelo fato dos agricultores da região não realizarem manejo de irrigação.

Com a utilização de tecnologias existentes no mercado é possível aplicar a água de maneira uniforme, evitando o desperdício. A água é aplicada na hora certa e na exata quantidade que a planta necessita. Deve-se dessa forma trabalhar a eficiência na produção, fazer mais com menos, atender a planta em sua necessidade hídrica e aplicar o método adequado de irrigação.

Atualmente, não existe no mercado nenhum equipamento que realize manejo de irrigação de forma automática. O que pode ser encontrado são temporizadores que permitem ligar e desligar o sistema de irrigação em períodos pré-estabelecidos ou equipamentos evapotranspirômetros que orientam o agricultor no que tange a quando e quanto irrigar, mas estes necessitam da intervenção humana durante todo o processo.

Nesse contexto, a proposta dessa pesquisa foi desenvolver uma técnica eficiente, de baixo custo para realizar manejo de irrigação em áreas de agricultura familiar, através da utilização de sistemas embarcados na tomada de decisão do processo de irrigação, visando a economia de água e energia. Foram desenvolvidos os dispositivos para monitoramento dos dados meteorológicos necessários para o cálculo da quantidade de água a ser reposta no solo através do sistema de irrigação.

Portanto, o objetivo geral desse trabalho foi avaliar a utilização de sistemas embarcados para tomada de decisão em processos de irrigação de hortaliças, visando a economia dos recursos hídricos e de energia elétrica. Como objetivos específicos, este trabalho teve como finalidades:

- Desenvolver os dispositivos necessários para o monitoramento das variáveis meteorológicas e consequente estimativa da evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith;
- Criar mecanismos capazes de permitir o acesso às informações meteorológicas, do volume de água aplicado e do tempo de irrigação definidos pelo sistema embarcado;

- Desenvolver e implementar os softwares necessários para o gerenciamento e controle do sistema de irrigação;
- Otimizar o uso da água e energia na agricultura irrigada;
- Capacitar os produtores rurais do perímetro irrigado Porção da Ribeira quanto ao uso da tecnologia desenvolvida;

Foram verificadas as seguintes hipóteses: a utilização de sistemas embarcados em processos de irrigação possibilita a realização do manejo de irrigação de forma automatizada. O desenvolvimento dos dispositivos para monitoramento meteorológico compensa para o custo do projeto.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Desenvolvimento Sustentável

Inicialmente, desenvolvimento reportava-se a um processo de descoberta, de uma mudança de estado. Mais tarde, desenvolver passou a significar modernizar, na qual uma sociedade passaria a ser considerada moderna. Esse moderno era medido pelo grau de industrialização e urbanização dessas sociedades (Carvalho, 2007).

A ambiciosa busca por crescimento, combinada com a percepção da natureza como fonte inesgotável de matéria-prima, fez com que o homem utilizasse dos recursos naturais de forma descontrolada e excessiva, produzindo inúmeros prejuízos ao meio ambiente, à medida que os elementos naturais, transformados em recursos, eram explorados sem respeitar seus limites.

Todo esse processo de transformação da natureza com o intuito de se obter maior crescimento e lucro, foi acelerado com a Revolução Industrial. Uma vez que as máquinas contribuíam para aumentar a produção, aumentando a necessidade de matéria-prima e, conseqüentemente, intensificando a exploração dos recursos naturais. Esse modelo de crescimento econômico gerou e ainda gera enormes desequilíbrios. De um lado o crescimento é capaz de melhorar diversos aspectos da vida humana, por outro, a degradação ambiental aumenta a cada dia.

Dessa forma, por um bom tempo as relações entre meio ambiente, desenvolvimento sustentável, econômico e social ocupavam apenas a atenção de especialistas e se caracterizavam como uma questão distante dos interesses do cidadão comum. De forma progressiva, esse cenário foi tendo alterações e a preocupação com a conservação dos recursos hídricos pode ser vista como precursora da consciência ambiental (Vargas, 2000).

Nesse sentido, a sustentabilidade é entendida como um novo modo de vida para as populações, proporcionando estratégias de sobrevivência para longo prazo, com o intuito de conservar os recursos naturais para as gerações futuras, a partir de uma relação equilibrada com o meio ambiente (Sachs, 2002).

Essas mudanças só ocorreram de fato a partir da criação de uma Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, criada pela ONU em 1983, presidida por Gro Harlem Brundtland, primeira ministra da Noruega, que tinha como objetivos: reexaminar as questões críticas relativas ao meio ambiente; propor novas maneiras de cooperação internacional na área do meio ambiente, com o intuito de orientar as políticas e ações no sentido das mudanças

necessárias; e dar ao cidadão, organizações voluntárias, empresas, institutos e governos uma compreensão maior desses problemas, incentivando-os a uma atuação firme (Carvalho, 2007).

Os trabalhos desta comissão foram concluídos em 1987, com a apresentação do Relatório de Brundtland, no qual a comissão propôs que o desenvolvimento econômico passasse a ser integrado à questão ambiental, surgindo a ideia de desenvolvimento sustentável, que recebeu a seguinte definição: Desenvolvimento Sustentável é aquele que atende às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras satisfazerem as suas próprias necessidades.

Para Buarque (2002), o desenvolvimento sustentável possibilita combinar crescimento econômico e eficiência, conservação ambiental, igualdade social e qualidade de vida. Nessa abordagem este estilo de desenvolvimento engloba as dimensões sociais, econômicas e ambientais, possibilitando o uso equilibrado e sustentado dos recursos naturais, respeitando a capacidade de reprodução e recomposição desses recursos, para criar mecanismos que permitam o acesso a esses recursos por toda a sociedade. Conforme Silva (2006) deve ter como base a transformação das relações entre o ser humano e o meio ambiente, buscando a conformidade entre eles.

A concepção de desenvolvimento sustentável “visa promover a harmonia entre os homens e entre estes e a natureza” (Wagner, 2004, p. 133). Dessa forma tem como alicerce o desenvolvimento integrado aos interesses sociais, econômicos e as possibilidades e limites da natureza.

Para Barbosa (2008), o desenvolvimento sustentável deve ser decorrente da interação entre o desenvolvimento social, econômico e da preservação e conservação ambiental. Ainda segundo a autora, a sustentabilidade consiste em encontrar meios de produção, distribuição e consumo dos recursos existentes de forma mais coesa, economicamente eficaz e ecologicamente viável.

No entanto, Portilho (2010) relata que as atuais questões ambientais estão relacionadas ao processo de produção e o estilo de vida e consumo das populações residentes em países desenvolvidos. Assim, os objetivos estratégicos das atividades econômicas para atingir a sustentabilidade deveria ser o aumento da produtividade global, estimulando atividades produtivas adaptas às condições ecológicas da região, fundamentando-se no emprego racional dos recursos naturais e na valorização do trabalho humano (Silva, 2006).

O desenvolvimento sustentável deve constituir-se em um objetivo de toda a humanidade

para que possa ser alcançado. Os povos devem se unir por esta causa e tomar simultaneamente providências urgentes no sentido de desenvolver em todos os cidadãos uma consciência ecológica, fundamentada na ética ambiental e voltada para a efetiva e concreta criação de uma sociedade moderna, que busque combater os problemas ambientais com soluções eficientes, unindo esforços de toda a sociedade, sem a exclusão de nenhum dos seus segmentos (Carvalho, 2007).

Alcançar o desenvolvimento sustentável solucionaria as incoerências das gerações atuais e futuras entre o crescimento econômico e a necessidade de conservação dos recursos naturais (Diegues, 2001).

Mas, o contínuo crescimento populacional, acompanhado da crescente necessidade de água para usos diversos, foi gradativamente aumentando a pressão sobre os recursos hídricos, onde tal situação levou a uma crescente preocupação com a sustentabilidade deste recurso (Lacerda e Cândido, 2013). Na perspectiva de alcançar a sustentabilidade, deve-se buscar um desenvolvimento econômico e ambiental sustentável que interaja com as políticas agrícolas (Leff, 2009).

Sabendo que a água doce é um recurso natural finito, cuja qualidade e quantidade vem diminuindo pelo aumento da população e ausência de políticas públicas voltadas para a preservação, o relatório de Brundtland (2014), enfatiza que se não ocorrer mudanças nos próximos anos, eventos climáticos podem levar a risco de insegurança alimentar, falta de água, perda de produção agrícola e de meios de renda, como também risco de perda da biodiversidade dos ecossistemas.

A partir do desenvolvimento sustentável, surge o interesse por uma agricultura sustentável. Onde o uso dos solos na agricultura tem como foco conciliar maior produtividade com menor degradação (Ferreira, 2008). Nesse entendimento, Gliessman (2005, p. 53), afirma que “a agricultura do futuro deve tanto ser sustentável quanto altamente produtiva para poder alimentar a crescente população humana”.

Para Blum (2001), a agricultura sustentável consiste na combinação de técnicas recentes que dão destaque a práticas de conservação do solo e da água, rotação e diversificação de culturas, controle de pragas, entre outros. Conforme Ferreira (2008), o termo sustentabilidade em um sistema de produção agrícola significa preservar o meio ambiente e ofertar melhores condições de vida para sociedade, tendo como desafio conciliar maior produtividade e menor degradação.

2.2 Recursos Hídricos e Agricultura Irrigada

A água é um recurso extremamente reduzido e apenas 2,5% está disponível como água doce. Destes 2,5%, boa parte encontra-se em estado sólido e confinada nos aquíferos, impossibilitando sua utilização. Sua distribuição ainda é desigual entre os países, pois 60% da água concentra-se em apenas 9 deles, enquanto muitos outros passam por um quadro de escassez (Jacobi e Grandisoli, 2017).

Embora o Brasil possua a maior reserva mundial de água doce, existem problemas regionais de escassez deste recurso. Estes problemas estão relacionados, basicamente, aos fatores da má distribuição espacial da água no território nacional e intensa concentração de populações nas áreas urbanas (Airoidi, 2007; Jacobi e Grandisoli, 2017).

O Brasil possui em seu território 13% de toda a reserva de água doce do mundo, mas 81% dessa água encontra-se na região Amazônica e o restante está distribuído nas demais regiões circunscritas ao abastecimento das áreas do território, onde se encontra 95% da população (Jacobi e Grandisoli, 2017). Segundo os autores, o Nordeste detém a menor concentração dos recursos hídricos do país, em torno de 3,3%, e ainda tem sua situação agravada em virtude do regime pluviométrico irregular, altas taxas de evaporação e baixa permeabilidade do solo. Devido a esses fatores, em algumas áreas, as retiradas de água são tão superiores a oferta, que a disponibilidade superficial de água está sendo reduzida e os recursos subterrâneos rapidamente esgotados.

Dessa forma, as interações do homem extrapolam os limites da natureza e geram grandes impactos ambientais, trazendo rápidas e irreversíveis mudanças nos ecossistemas. Os usos múltiplos da água e as permanentes necessidades de água para fazer frente ao crescimento populacional, as demandas industriais e agrícolas têm gerado pressão sobre os recursos hídricos superficiais e subterrâneos (Tundisi, 2003). Ainda segundo o autor, os recursos hídricos são estratégicos para o homem, plantas e animais, entretanto, a multiplicidade do seu uso muitas vezes resulta em alterações tanto na quantidade como na qualidade.

A irrigação é a atividade humana que mais consome água, cerca de 70% de todo o volume captado, sendo superior ao setor industrial e doméstico, podendo alcançar 85% em áreas de clima seco. Já no Brasil a agricultura utiliza 61% de todo o volume captado (Airoidi, 2007). Como a necessidade do aumento na produção de alimentos vem aumentando a cada ano (WWAP, 2015), existe a necessidade do uso consciente dos recursos hídricos para termos um aumento sustentável desta produção.

Segundo o Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos, “até 2050, a agricultura precisará produzir globalmente 60% a mais de alimentos, e 100% a mais nos países em desenvolvimento” (WWAP, 2015, p. 5). Apesar dos atuais índices de crescimento da demanda de água para agricultura já serem insustentáveis para o planeta, o setor terá que aumentar sua eficiência, aumentando a produtividade das culturas com relação aos recursos hídricos já utilizados (WWAP, 2015).

O relatório ainda prevê para o período entre os anos 2000 e 2050 um aumento de 400% da demanda de água pela indústria manufatureira, afetando outros setores, como a agricultura irrigada e o uso humano, com boa parte desse aumento ocorrendo em países em desenvolvimento (WWAP, 2015). E ressalta que até 2030 o planeta enfrentará um déficit de água de 40%, a menos que seja aprimorada a gestão dos recursos hídricos (WWAP, 2015).

A demanda por água na irrigação no Brasil deve continuar sua tendência de crescimento, uma vez que a área atualmente irrigada representa menos de 20% da área potencialmente irrigável, de aproximadamente 30 milhões de hectares (Embrapa, 2014). O que evidencia a necessidade dos produtores irrigantes, seus principais usuários, manejarem esse recurso com maior eficiência possível, pois as reservas de água de boa qualidade se apresentam cada vez mais escassas.

Hoje nos encontramos com grandes incertezas no tocante a quantidade de água necessária para atender a demanda de alimentos, energia e outros usos humanos, como também o uso sustentável dos ecossistemas.

O aumento e a diversificação dos usos múltiplos, o extenso grau de urbanização e o aumento populacional resultaram em uma multiplicidade de impactos que exigem evidentemente diferentes tipos de avaliação, novas tecnologias de monitoramento e avanços tecnológicos no tratamento e gestão das águas. Este último tópico tem fundamental importância no futuro dos recursos hídricos. (Tundisi, 2003, p. 8)

Quando nos referirmos à gestão de recursos hídricos, tratamos das mais diversas formas de equacionar, planejar e otimizar as questões de escassez deste recurso, visando o uso correto em benefício da sociedade. Dessa forma um dos objetivos a ser seguido é o aumento na eficiência do uso da água na agricultura, com redução das perdas e com geração de impactos negativos mínimos sobre o meio ambiente.

A agricultura irrigada para manter-se sustentável, em termos ambientais, precisa ser eficiente no uso da água na irrigação. A irrigação inadequada, aplicação de pouca água, pode gerar prejuízos na produção, tendo em vista que não obterá o benefício esperado. Por outro

lado, a aplicação excessiva é bastante destrutiva, porque satura o solo, impedindo a sua aeração, lixívia nutrientes, induz maior evaporação e salinização (Guimarães e Bauchspiess, 2012). Além disso, o excesso propicia microclima favorável ao desenvolvimento de doenças, que podem causar prejuízo à cultura (Andrade e Borges Júnior, 2008).

A baixa adoção de tecnologias adequadas de manejo de irrigação entre os agricultores pode ser atribuída à crença que estes têm de que estas técnicas são complicadas, tomam muito tempo, utilizam equipamentos caros, empregam cálculos complexos e terminariam não trazendo o retorno econômico significativo (Marouelli *et al.*, 2010). A resistência é justificada pela baixa capacitação dos agricultores, principalmente dos pequenos irrigantes, e de natureza técnica, uma vez que as tecnologias existentes necessitam de conhecimento técnico por parte do produtor ou a contratação de mão de obra especializada (Pinto, 2008). Aspectos como: custo, cálculos e conhecimento técnico têm sido grandes empecilhos para a utilização de tecnologias dentre os diversos usuários de sistemas de irrigação.

Os principais objetivos do emprego de técnicas adequadas para o manejo de irrigação incluem aumentar a produtividade, melhorar a qualidade do produto e, simultaneamente, minimizar os gastos com água e energia elétrica, além de reduzir as condições favoráveis à ocorrência de pragas e doenças (Marouelli *et al.*, 2010). Nesse sentido, possibilita a obtenção de duas ou mais colheitas no mesmo ano, na mesma área, além de introduzir culturas de maior valor agregado, proporcionando um maior retorno econômico aos agricultores (Bernardo *et al.*, 2011).

A irrigação aparece como de fundamental importância para atender as necessidades hídricas das culturas, seja corrigindo a distribuição natural das chuvas ou modificando as possibilidades agrícolas de determinada região, exemplo o semiárido nordestino, que se caracteriza por apresentar baixas precipitações pluviométricas e má distribuição temporal das chuvas, visando assegurar a produção dos alimentos de forma adequada (Carvalho, 2011).

A irrigação é definida por Mantovani *et al.* (2012) como uma estratégia para o aumento da produção e rentabilidade da propriedade agrícola de forma sustentável, preservando o meio ambiente e criando condições para a manutenção do homem no campo, mediante a geração de empregos permanentes e estáveis.

Mantovani *et al.* (2012) afirmaram que mais da metade da população mundial depende de alimentos produzidos em áreas irrigadas. Dessa forma, observa-se a necessidade de programas de gerenciamento de irrigação que auxiliem os produtores a utilizar melhor as

técnicas de manejo da irrigação, garantindo elevadas produtividades com o uso racional da água e energia.

Ainda hoje, o produtor rural adota métodos inadequados de controle de irrigação que acabam por irrigar suas culturas além do necessário por temer baixas na produtividade ocasionadas pelo estresse hídrico das plantas. Esse excesso pode comprometer a produção devido a problemas no sistema radicular e doenças nas plantas, além de acarretar desperdício de energia e água, causando prejuízos financeiros e ambientais, como a lixiviação de nutrientes e riscos de contaminação dos lençóis freáticos (Mantovani *et al.*, 2012; Bernardo *et al.*, 2011).

Conforme Guimarães e Bauchspiess (2012) é necessário o monitoramento e a alteração de determinados parâmetros dependendo dos resultados do plantio, condições climáticas e estágio de desenvolvimento da cultura. Para minimizar esses erros é necessário variar a frequência de irrigação de acordo com os estágios da cultura.

Portanto, para um bom gerenciamento da irrigação é necessário utilizar técnicas que calculem com exatidão a quantidade de água necessária para a cultura. Dentre os métodos existentes, o método de Penman-Monteith é considerado, internacionalmente, o mais apropriado para o manejo e a programação da irrigação (Carvalho *et al.*, 2011). É um método que representa de maneira consistente o fenômeno biofísico da evapotranspiração através de parâmetros climáticos como irradiância solar, temperatura do ar, umidade atmosférica e velocidade do vento.

Como foi observado, as atividades agrícolas demandam grandes quantidades de água, sendo cada vez mais preocupante a sua escassez, esforços têm sido empregados no desenvolvimento de pesquisas que possibilitem a sua economia, em todo o planeta. Nesse sentido, o correto conhecimento da demanda hídrica das culturas é de grande importância como alternativa para racionalizar o uso de água em projetos de irrigação (Carvalho *et al.*, 2011).

2.3 Demanda Hídrica

Em um projeto de irrigação, diversas variáveis são importantes quando se deseja o uso racional da água. Porém, a estimativa do consumo de água pelas culturas assume grande destaque, na medida que se busca maximizar produção e minimizar custos.

Para um bom gerenciamento da irrigação é necessário utilizar técnicas que calculem com exatidão a quantidade de água evapotranspirada. A evapotranspiração (ET) é a combinação

de dois processos: o primeiro se refere a água perdida da superfície do solo através da evaporação e o outro a água consumida pela cultura através da transpiração (Allen *et al.*, 1998).

A evaporação é o processo por meio do qual a água líquida é convertida em vapor e removida da superfície evaporante (Allen *et al.*, 1998). Já a transpiração consiste na vaporização da água líquida contida nas plantas. Normalmente, as culturas perdem água pelos seus estômagos, que são aberturas pequenas nas folhas das plantas pelo qual ocorre a passagem do vapor d'água (Allen *et al.*, 1998).

Os processos de evaporação e a transpiração são influenciados pelas condições climáticas, devendo ser considerada a radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento, quando avaliarmos estes dois processos (Allen *et al.*, 1998; Pinto e Aguiar Neto, 2008). A taxa de transpiração também é influenciada pelo tipo da cultura e fases do seu desenvolvimento (Allen *et al.*, 1998).

Existem duas metodologias para determinar a evapotranspiração das culturas. Os métodos diretos, os quais se baseiam na medição da evapotranspiração em lisímetros, através do balanço de entrada e saída de água no solo. É uma metodologia que exige aparatos específicos e medições precisas de diversos parâmetros físicos no balanço hídrico do solo (Bernardo *et al.*, 2011).

De acordo com Pinto e Aguiar Neto (2008), lisímetros são equipamentos de medida real do balanço hídrico de uma cultura considerando que devem estar instalados no local da produção. São recipientes grandes abrangendo uma massa no solo, colocado no campo para representar suas condições naturais, utilizados para determinar a evapotranspiração de uma cultura em crescimento. Segundo Allen *et al.* (2011), esse tipo de equipamento é limitado em função do alto custo, mão de obra especializada, instalação e manutenção.

A outra metodologia consiste no modo indireto, no qual não medem a evapotranspiração diretamente, mas sim, através da medição de outras variáveis que servem de entrada em equações para calcular a evapotranspiração.

Allen *et al.* (1998) recomenda que em vez de medir a evapotranspiração habitualmente para o gerenciamento da irrigação, seja feita sua estimativa através do método de Penman-Monteith. Este método foi adotado por apresentar resultados relativamente exatos e consistentes tanto em climas áridos como em climas úmidos. Além disso, Oliveira *et al.* (2008) afirma que é um método que possui maior praticidade e menor exigência de mão de obra no manejo de irrigação.

Por meio desse método, calcula-se a evapotranspiração de referência com base em dados meteorológicos, uma vez que são eles que afetam a evapotranspiração, sendo eles: radiação solar, velocidade do vento, temperatura e umidade relativa do ar.

A evapotranspiração de referência é expressa por ETo e se refere a uma cultura hipotética, similar a um gramado, mantida sob condições ideais de crescimento (Allen *et al.*, 1998; Guedes Filho *et al.*, 2011). O conceito de evapotranspiração de referência (ETo) serve para o estudo da demanda de evapotranspiração da atmosfera, independente do tipo e do desenvolvimento da cultura, como também das práticas de manejo (Carvalho, 2011; Giacomelli, 2011).

Uma vez calculado a ETo , o passo seguinte é determinar a evapotranspiração da cultura (ETc) a ser irrigada. A ETc é obtida ao multiplicar a ETo por um coeficiente de cultura (Kc) considerando o estágio de desenvolvimento da planta, agregando as características da cultura e do clima local (Doorenbos e Pruitt, 1977).

$$ETc = ETo \cdot Kc \quad (1)$$

A ETc difere distintamente da ETo , devido a cobertura do solo, as propriedades do dossel e a resistência aerodinâmica das culturas serem diferentes da grama. Os efeitos das características da cultura que diferem da grama são integrados no coeficiente da cultura, onde este coeficiente é utilizado como aproximação (Allen *et al.*, 1998). A seguir, encontram-se valores referencias do Kc para algumas culturas (Tabela 1).

Tabela 1 - Coeficientes de cultura (Kc) para o cálculo da evapotranspiração da cultura, conforme hortaliça e estágio de desenvolvimento das plantas

Hortaliça	Estádio de desenvolvimento			
	Inicial Fase (1)	Vegetativo Fase (2)	Produção Fase (3)	Final Fase (4)
Alface, cebolinha, espinafre	0,70	0,85	1,05	0,95
Alho, cebola	0,70	0,85	1,05	0,75
Batata	0,45	0,75	1,15	0,75
Batata-doce	0,55	0,80	1,15	0,70
Cenoura, couve-flor, repolho	0,70	0,85	1,10	0,95

Fonte: Marouelli *et al.* (2010).

De acordo com o método da FAO para a estimativa de valores de coeficiente de Cultura, a cultura é dividida em quatro estádios fenológicos. O estágio 1 corresponde ao início do crescimento da cultura, quando a superfície do solo não está completamente coberta pela cultura. O estágio 2 corresponde de 10% a 80% de cobertura do solo. O estágio 3 corresponde ao início da cobertura plena do solo até o início da maturação, que é indicada pela descoloração

ou pela queda das folhas. O estágio 4 que corresponde ao início da descoloração ou queda das folhas até a plena maturação ou ponto de colheita (Doorenbos e Pruitt, 1977; Albuquerque, 2008). A tabela 2 apresenta os quatro estádios fenológicos do ciclo de desenvolvimento.

Tabela 2 - Coeficiente da cultura (Kc) em função do seu estágio de desenvolvimento

Estádio de desenvolvimento	Características do estágio	Kc
Inicial (1)	Da germinação até a cultura cobrir 10% da superfície do terreno, ou 10 a 15% do seu desenvolvimento vegetativo	0,2 a 1,0
Secundário ou de desenvolvimento vegetativo (2)	Do final do primeiro estágio até a cultura cobrir de 70% a 80% da superfície do terreno ou atingir de 70% a 80% do seu desenvolvimento vegetativo	Varia linearmente entre os valores do primeiro e terceiro estádios
Intermediário ou de produção (3)	Do final do segundo estágio até o início da maturação	0,9 a 1,25
Final ou de maturação (4)	Do início da maturação até a colheita ou final da maturação	Varia linearmente entre os valores do terceiro estágio e 0,3 a 1,0

Fonte: Bernardo et al. (2011)

Segundo Bernardo et al. (2011), quanto maior a demanda evapotranspirométrica local ou quanto mais sensível for a planta ao déficit de água no solo, maior será o valor de Kc.

2.4 Estações Meteorológicas

Os dados climáticos necessários para o cálculo da evapotranspiração através do método de Penman-Monteith são normalmente obtidos por estações meteorológicas convencionais ou automáticas. De acordo com Cunha e Martins (2004), quando as medições são feitas por estações meteorológicas convencionais, pode ocorrer erros do observador gerando um resultado equivocado.

Um sistema eletrônico de aquisição de dados para a mensuração automática de dados meteorológicos tem o objetivo de facilitar as leituras das variáveis meteorológicas e evitar erros de leituras dos equipamentos de medição dessas variáveis. O registro automático dos dados permite que o usuário não tenha que fazer leituras rotineiras, pelo fato dos instrumentos mensurarem e registrarem automaticamente os dados (Finholdt *et. al.*, 2011). Eles surgiram como uma alternativa para suprir a necessidade de monitorar e controlar o funcionamento de um sistema físico de forma segura, rápida e independente do observador, permitindo uma maior variedade na coleta dos dados, bem como um maior número de variáveis e medidas a serem

realizadas.

Dessa forma, as estações meteorológicas automáticas nos permitem estabelecer um melhor monitoramento das grandezas climáticas pelo fato de permitir o acesso a medidas em tempo real e, conseqüentemente, a uma tomada rápida de decisão. O que possibilita a implantação de programas de gerenciamento de irrigação mais eficientes, reduzindo o consumo de água, energia elétrica e mão de obra, proporcionando uma maior rentabilidade, aumento da produtividade e preservação ambiental.

Existem diversos modelos de estações meteorológicas automáticas no mercado, porém seu uso é limitado em virtude de ser uma tecnologia com alto custo para aquisição e manutenção, operacionalidade complexa e pequena disponibilidade de suporte técnico (Finholdt, 2008). Atualmente, uma estação meteorológica automática que atende as normas da Organização Meteorológica Mundial (OMM), com todos os elementos climáticos necessários para o cálculo da evapotranspiração pelo método de Penman-Monteith, custa em torno de \$ 3.900,00 (Três mil e novecentos dólares), no ano de 2018, não contabilizando os custos de manutenção.

As estações meteorológicas automáticas coletam os dados climáticos através de sensores eletrônicos e eletromecânicos. Essa leitura ocorre em períodos pré-programados, onde as variáveis lidas são transformadas em pulsos, diferença de potencial e corrente elétrica e armazenados em módulos de memórias presentes em uma central (*data logger*), possibilitando o processamento desses dados. Os valores coletados devem seguir as normas da OMM, no que se refere a localização, instalação dos equipamentos, calibração e aferição dos instrumentos, permitindo a comparação dos dados coletados com outras estações, onde a diferença deve ser exclusivamente devido à variação do macroclima (Pereira *et al.*, 2002).

Assim, a localização de uma estação meteorológica, convencional ou automática, deve representar a área para onde as observações serão destinadas. Deve-se então tomar algumas precauções como evitar relevo acidentado e proximidade de maciços florestais que venham projetar sombra na área da estação ou interferir nas condições atmosféricas (Neves, 2013).

Atualmente, os agricultores familiares que possuem áreas irrigadas são desestimulados a adquirir uma estação meteorológica, devido ao seu auto custo e por não fornecerem, de maneira direta, as informações de quando irrigar e o tempo de funcionamento do sistema de irrigação. O resultado é o desperdício de água, energia elétrica, e o aumento dos problemas sociais e ambientais oriundos do uso inadequado dos recursos hídricos.

2.4.1 Radiação Solar

A radiação solar é a maior e mais importante fonte de energia do planeta, podendo transformar grande quantidade de água líquida em vapor d'água. A quantidade máxima de água que pode ser evaporada vai depender da localização, do período do ano e do estado da atmosfera, uma vez que a presença de nuvens pode refletir e absorver parte da radiação que chegaria à superfície evaporante (Allen *et al.*, 1998). Segundo Chang (1971) a radiação solar é considerada o elemento climático de maior importância na estimativa da taxa de evapotranspiração correspondendo aproximadamente a 80% da ETo. Com isso, ao avaliar o efeito da radiação solar na evapotranspiração, deve-se ter em mente que nem toda energia disponível é utilizada para evaporação da água, onde parte dela é usada para aquecer a atmosfera e o solo (Allen *et al.*, 1998).

Parte da radiação que chega à atmosfera é difundida, refletida ou absorvida pelos gases atmosféricos, nuvens e pó. A quantidade que chega à superfície horizontal é chamada de radiação solar, ou irradiância solar, ou radiação de ondas curtas, ou ainda de irradiância global (R_s) (Allen *et al.*, 1998).

A radiação solar (R_s) é o elemento climático mais importante na estimativa da evapotranspiração (Silva *et al.*, 2012). Constituindo-se como fator condicionante da temperatura do ar e do solo (Abraha e Savage, 2008). Tornando-se um elemento de grande importância em atividades agropecuárias (Cargnelutti Filho *et al.*, 2007).

Segundo Borges *et al.* (2010), a radiação solar é a força motriz para diversos processos físico-químicos e biológicos que acontecem no sistema terra-atmosfera, tornando-se uma variável meteorológica de grande importância em pesquisas de necessidade hídrica de culturas irrigadas, modelagem de crescimento e produção vegetal, mudanças climáticas, entre outros.

Sua unidade padrão utilizada para representar a energia recebida por uma unidade de superfície em unidade de tempo é Megajoule por metro quadrado dia ($\text{MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$) (Allen *et al.*, 1998). Conforme os autores, a não disponibilidade de dados referentes a radiação solar, pode-se utilizar estimativas a partir de dados de insolação.

Os piranômetros são os instrumentos utilizados para medição da radiação solar e estão divididos em duas categorias quanto a sua construção: os piranômetros térmicos, à base de termopares, e os fotovoltaicos, à base de silício. Os térmicos são mais precisos, mas possuem um custo maior comparado com o fotovoltaico (Freire, 2008).

Os piranômetros fotovoltaicos convertem a irradiância solar em uma tensão elétrica correspondente. Essa tensão altera de valor conforme a intensidade e comprimento de onda incidente (Freire, 2008).

Entretanto, a medição da radiação solar é escassa quando comparada a outras grandezas como temperatura e precipitação, uma vez que a maioria das estações meteorológicas do Brasil não dispõe de equipamentos para sua medição (Silva *et al.*, 2012; Fietz e Fisch, 2009). Isso se dá pelo alto custo para aquisição dos equipamentos, necessidade de manutenção e calibração (Buriol *et al.*, 2012; Fietz e Fisch, 2009; Dornelas *et al.*, 2006)).

A não disponibilidade de instrumentos específicos para sua medição, torna necessária a utilização de modelos matemáticos para sua estimativa. Segundo a FAO, um dos métodos mais utilizados é o modelo de Angstrom-Prescott. Esse modelo faz a estimativa da radiação solar em função da radiação no topo da atmosfera (R_a), duração relativa da luz do dia (n/N) e dos coeficientes a_s e b_s da equação. Os valores de a_s e b_s quando não disponíveis para o local, devem seguir a orientação da FAO que propõe utilizar 0,25 para a_s e 0,5 para b_s . (Allen *et al.*, 1998).

$$R_s = (a_s + b_s \cdot n/N) \cdot R_a \quad (2)$$

Onde:

n = duração real da luz do dia, h.

N = duração máxima possível da luz do dia.

R_a = radiação no topo da atmosfera, $\text{MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$.

2.4.2 Temperatura do ar

A Organização Meteorológica Mundial (OMM) define a temperatura do ar como a temperatura indicada por um termômetro exposto ao ar em um local protegido da radiação solar direta (WMO, 2008).

A temperatura do ar possui uma relação direta com a intensidade de radiação solar recebida. Segundo Allen *et al.* (1998), em dias ensolarados e quentes, a perda de água evapotranspirada é maior do que em um dia nublado e fresco, isso se dá pelo fato que a radiação solar absorvida pela atmosfera, juntamente com a energia emitida pela terra, eleva a temperatura

do ar. Dessa forma, a temperatura do ar interfere nas condições ambientais, interagindo com outras variáveis importantes no processo de evapotranspiração.

Na agricultura, a medição e controle da temperatura do ar está sendo amplamente empregada devido à grande importância que a temperatura exerce no metabolismo das plantas (Teruel, 2010). Conforme (Virgens Filho *et al.*, 2013), a temperatura máxima exerce influência bioclimática ao longo do ano, tanto no crescimento (tamanho) como no desenvolvimento (estádio) das plantas.

A temperatura do ar é medida através de termômetros, termistores ou termopares montados em um abrigo (Allen *et al.*, 1998). Através dos termômetros de mercúrio é possível aferir medidas de temperatura através da expansão do metal. Entretanto, ao decorrer do dia a temperatura sofre variações influenciadas principalmente pelo aquecimento solar, atingindo dois valores extremos, temperatura máxima e mínima, que representam a maior e a menor temperatura no período de um dia (Palmieri, 2009). São esses os valores utilizados pelo método de Penman-Monteith para o cálculo da evapotranspiração.

Essas duas medidas são realizadas por termômetros específicos, chamados de termômetros de máxima e mínima. O termômetro de máxima utiliza o mercúrio como elemento sensível, que através de um dispositivo próximo ao bulbo, ao marcar a temperatura máxima do dia, impede o retorno do mercúrio. Já o termômetro de mínima utiliza o álcool como elemento sensível.

As estações meteorológicas convencionais encontram-se constituídas com esses dois instrumentos, onde através das medidas de temperatura máxima e mínima é calculado a média aritmética da temperatura média diária (Palmieri, 2009).

O outro elemento capaz de medir a temperatura do ar, os termistores, são fabricados utilizando materiais semicondutores, que através da variação da resistência elétrica, proporcional ou inversa, representam a temperatura ao qual foram expostos (Neves, 2013). Já os termopares, consistem em dois fios de materiais diferentes em contato nas suas extremidades, formando um circuito fechado. O termopar dessa maneira converte a temperatura para uma voltagem continua muito pequena. A voltagem de saída varia com a diferença de temperatura entre as junções, dessa forma, quanto maior a diferença de temperatura maior a voltagem de saída (Voltan, 2012; Pires *et al.*, 2006).

As combinações de materiais mais frequentemente empregadas na fabricação de termopares são ferro-constantan, cromo-alumínio, cobre-constantan, plantinha/platina-platina-

ródio e cromo-constantan. A escolha dos materiais dependerá da faixa de trabalho, da precisão e da resistência dos materiais às condições inseridas (Pires *et al.*, 2006).

A utilização de termopares e termistores tem sido muito frequente para leitura da temperatura do ar, em função da possibilidade de poder ser ligado a um *data logger* de uma estação meteorológica automática, de modo a coletar os dados sem a necessidade de um operador presente, o que não é possível com a utilização dos termômetros.

Em meteorologia é comum utilizar os termos temperatura do ar à superfície e temperatura do ar à sombra, de forma que as duas maneiras são equivalentes para representar a temperatura atual em um ponto da atmosfera próximo à superfície da terra (Varejão-Silva, 2006).

2.4.3 Umidade relativa do ar

A umidade relativa é a relação entre a quantidade de água atual no ar e a quantidade que poderia ter à mesma temperatura. É adimensional e geralmente expressa em porcentagem (Allen *et al.*, 1998; Voltan, 2012). Seu valor é determinado pela temperatura ambiente, uma vez que a capacidade de contenção de vapor d'água é função da temperatura do ar (Neves, 2013).

Em climas úmidos de regiões tropicais, apesar da elevada quantidade de energia, a alta umidade relativa reduz a evapotranspiração, já que o ar está sempre próximo da saturação. Em contrapartida, campos bem úmidos em regiões áridas, secas e quentes, consomem mais água devido a maior disponibilidade de energia e poder evaporante da atmosfera (Allen *et al.*, 1998). Dessa forma, pode-se dizer que um ar seco possui umidade relativa nula, enquanto que a umidade relativa igual a 100% significa um ar saturado.

Segundo Neves (2013), a variação diária da umidade relativa é maior no verão do que no inverno, de forma semelhante à temperatura do ar. Os valores mais elevados ocorrem durante a madrugada, quando a temperatura do ar atinge seu valor mínimo, e mais baixos no início da tarde, condizente ao máximo da temperatura (Allen *et al.*, 1998; Neves, 2013; Finholdt, 2008).

A umidade relativa é medida através de higrômetros e psicrômetros. Nos higrômetros o processo é baseado no procedimento de que alguns materiais, como por exemplo o cabelo, mudam seu comprimento em função das mudanças na umidade do ar. Outra forma se dá

utilizando capacitância, onde a capacidade elétrica é alterada em função da umidade relativa (Allen *et al.*, 1998).

Nos higrômetros capacitivos seu funcionamento é baseado na detecção da alteração da capacitância de uma fina película de polímero entre dois eletrodos condutores (Voltan, 2012). A película fina de polímero absorve ou libera vapor d'água, quando a umidade relativa do ar no ambiente aumenta ou diminui. Com isso, as propriedades dielétricas da película de polímero mudam, alterando a capacitância do sensor. Dessa forma, a alteração da capacitância pode ser medida por um circuito eletrônico, possibilitando determinar o valor da umidade relativa do ambiente.

O outro método de medição se dá através de elementos resistivos, que ao entrar em contato com a pressão de vapor d'água presente na atmosfera ocorre uma variação na resistência (Voltan, 2012).

Segundo (Dunn, 2006), os higrômetros resistivos são pequenos, robustos, confiáveis e apresentam alta longevidade, no entanto, devem ser calibrados periodicamente, em virtude da sua resistência variar com o passar do tempo. Conforme (Austerlitz, 2003), os higrômetros capacitivos normalmente são mais estáveis em relação aos higrômetros resistivos.

Os psicrômetros são os instrumentos de referência para medida da umidade relativa do ar, constituídos de dois termômetros comuns, denominados termômetro de bulbo seco e de bulbo úmido. Onde o termômetro de bulbo seco é composto de mercúrio com seu bulbo exposto ao ar, enquanto o de bulbo úmido possui seu bulbo envolvido por um cordão umedecido em água, a qual evapora, possibilitando o cálculo da umidade relativa pela diferença de temperatura (Silva, 2000).

Na agricultura, a medição e controle da umidade relativa torna-se de grande relevância, uma vez que as alterações dessa grandeza podem afetar diretamente o desempenho de uma produção agrícola (Palmieri *et al.*, 2014). Desta forma, influencia a demanda evaporativa da atmosfera e, por consequência, o consumo de água das culturas (Teixeira *et al.*, 2011). Além disso, pode influenciar na disseminação de pragas e doenças, as quais a maioria dos casos são causados por microrganismos influenciados pela umidade relativa do ar (Palmieri, 2009).

2.4.4 Abrigos Meteorológicos

Em estações meteorológicas a temperatura e umidade relativa do ar são medidas dentro de abrigos seguindo os padrões da Organização Meteorológica Mundial (OMM) e instalados entre 1,5 e 2 m do solo. Os abrigos são projetados para proteger os instrumentos da exposição à incidência de radiação solar direta (Allen *et al.*, 1998; Amorim *et al.*, 2015). De modo que o abrigo se comporte como um dissipador de calor (Amorim *et al.*, 2015). De acordo com Finholdt (2008), a construção de abrigos deve proporcionar a passagem do fluxo de ar pelos elementos sensíveis. Dessa forma, os valores de temperatura e umidade do ar medidos devem representar as condições térmicas do local.

Conforme Castelhana e Roseghini (2011), a confecção de abrigos para a medição de variáveis ambientais deve visar a mesma confiabilidade das medidas obtidas com os abrigos meteorológicos padrões já existentes no mercado.

2.4.5 Velocidade do Vento

O vento é das variáveis climáticas mais instáveis, variando em pequenos intervalos de tempo sua direção e velocidade, atingindo valores extremos e em seguida podendo ocorrer uma prolongada calmaria (Cardoso *et al.*, 2009). Sua velocidade varia em função da localização geográfica e altitude (Sampaio *et al.*, 2005).

A velocidade do vento possui um papel importante no processo de evaporação. Quando a água é vaporizada, o ar fica saturado sobre a superfície evaporante. Dessa forma, o vento remove a massa de ar saturada e mistura o ar saturado com o ar seco, aumentando o poder evaporante da atmosfera. Se este ar não for continuamente substituído por ar seco, a remoção de vapor d'água e a taxa de evapotranspiração diminuirão (Allen *et al.*, 1998). Com isso, no processo de evapotranspiração a remoção do vapor d'água depende, em grande parte, do vento e da turbulência do ar.

Possui grande influência no desenvolvimento e crescimento das plantas, sob três aspectos: transpiração, absorção de CO₂ e efeitos mecânicos nas folhas, galhos e caule. A ocorrência de ventos constantes além de aumentar a evapotranspiração, influencia na irrigação por aspersão, provocando o fenômeno da deriva de partículas (Cardoso *et al.*, 2009).

O vento é caracterizado pela sua direção e velocidade, mas para o cálculo da evapotranspiração apenas a velocidade do vento é relevante. Sua velocidade é expressa em metros por segundo (m s^{-1}) ou quilômetros por hora (km dia^{-1}) (Allen *et al.*, 1998).

A velocidade do vento é medida em anemômetros, onde estes são formados por conchas que ao serem giradas pela força do vento, conta-se o número de voltas por um intervalo de tempo e calcula-se sua velocidade média (Allen *et al.*, 1998). São construídos utilizando materiais resistentes e por isso podem ser utilizados em locais abertos. A construção se dá através do uso de rolamentos para minimizar o atrito, reduzindo dessa forma a inércia, podendo ocasionar erros de medidas referentes aos valores mínimos. Com isso, a maioria caracteriza-se pela elevada inércia inicial ou elevada zona morta, normalmente superior a $0,50 \text{ m.s}^{-1}$, em função da sua própria construção (Sampaio *et al.*, 2005).

Em sua construção, os anemômetros de conchas são formados por uma parte móvel e um mecanismo contador. As conchas, ou copos, são geralmente 3 ou 4 montadas simetricamente e fixadas nas extremidades de hastes presas a um eixo central vertical que gira. A parte côncava das conchas são sempre voltadas no mesmo sentido para que girem com a pressão do vento em torno do eixo central. O mecanismo central ao girar aciona o dispositivo utilizado para contar o número de rotações, podendo ser *encoder*, *reed switch*, sensor de efeito *hall*, entre outros.

Para estimativa da evapotranspiração a velocidade média diária do vento deve ser medida a dois metros acima do nível do solo (Allen *et al.*, 1998). Segundo Cardoso *et al.* (2009), em consequência do atrito entre a massa de ar em deslocamento e a superfície do solo, a velocidade do vento diminui com a diminuição da altura, sendo nula junto à superfície.

Conforme Sampaio *et al.* (2005), a utilização de anemômetros para otimização de práticas agrícolas é ainda pouco comum e as razões principais se dão pelo desconhecimento e/ou pelo custo deste instrumento, seja de forma individual ou através da aquisição de estações meteorológicas.

2.4.6 Precipitação Pluviométrica

A precipitação é o fenômeno da natureza responsável por repor a água que evapotranspirou da superfície (Finholdt, 2008). As chuvas exercem função importante para sociedade, principalmente na agricultura, onde é exigido um consumo alto dos recursos hídricos pelas culturas (Voltan, 2012). O índice pluviométrico, ou altura pluviométrica, de uma determinada localidade é expressa em milímetros por metro quadrado (mm.m^{-2}) e sua intensidade é expressa em milímetros por hora (mm.h^{-1}) (Sousa e Silva, 2013).

A disponibilidade do volume pluviométrico é determinante para quantificar a necessidade de irrigação das culturas, tornando-se essencial para o planejamento do manejo de irrigação (Sousa e Silva, 2013; Mantovani *et al.*, 2013).

Sua medição é feita através de dois instrumentos meteorológicos: o pluviômetro e o pluviógrafo. A principal diferença entre eles é que os pluviógrafos registram automaticamente os dados, ao contrário do pluviômetro que necessita leituras manuais em intervalos de tempo. Essa diferença permite aos pluviógrafos operarem de forma ininterrupta por um longo período e não sujeito a erros humanos de leitura, apresentando um alto grau de confiabilidade (Kuchler *et al.*, 2010). Dessa forma, os pluviômetros não medem a intensidade das chuvas, mas somente a altura pluviométrica.

O pluviômetro é um instrumento com uma superfície de captação horizontal, semelhante a um funil, e um depósito para acumular a água recolhida (Dulnik, 2006). Existem vários tipos de pluviômetros no mercado, entre os modelos disponíveis estão o Ville de Paris, muito utilizado em instituições de pesquisa, e os pluviômetros do tipo cunha, modelo mais simples e normalmente o escolhido pelos agricultores (Voltan, 2012).

No entanto, o maior problema dos pluviômetros é não ser adequado para medir chuvas de pequena duração. Já os pluviógrafos são indispensáveis para o estudo das chuvas de curta duração (Dulnik, 2006)

Os pluviógrafos de caçambas basculantes são empregados principalmente em estações meteorológicas automáticas (Voltan, 2012). O funcionamento de um pluviógrafo basculante é iniciado com a incidência de gotas de chuva no interior do cone coletor. A água é depositada em uma das concavidades da balança que está posicionada no interior do aparelho. No momento em que a primeira concavidade torna-se cheia, a balança se move sobre seu eixo em movimento descendente para escoar a água, isso se dá em função do peso exercido pelo volume de água coletado. No mesmo instante a segunda concavidade fica posicionada para receber a água da chuva. Esse processo se repete durante todo o período de chuva.

O pluviógrafo basculante possui um movimento semelhante ao de uma gangorra e com isso torna possível a medição pluviométrica através do fechamento de um contato eletromagnético instalado na balança do aparelho. Dessa forma, quando a chave magnética é acionada, um sinal elétrico é emitido correspondente a um determinado volume de chuva.

O cálculo do volume pluviométrico é feito através da medida do diâmetro do funil coletor, da quantidade de chuva acumulada em uma concavidade da balança e ao número de

vezes que a balança torna-se cheia. Segundo Fisch *et al.* (2007), esse tipo de equipamento permite o registro do horário de início e fim da chuva, como também do seu volume.

2.5 Sistemas e manejo de irrigação

A irrigação consiste em atender às necessidades hídricas da cultura, permitindo o seu desenvolvimento de forma adequada. O manejo de irrigação é visto como a implantação de uma série de procedimentos com o intuito de saber informar quando e quanto irrigar.

A questão quanto irrigar passa pela definição da lâmina de irrigação, sendo que a aplicação dessa lâmina com os atuais sistemas de irrigação implica em perdas, que variam com as características do sistema de irrigação, com as condições climáticas do momento da irrigação e com a cultura e seu estágio de desenvolvimento (Mantovani *et al.*, 2012). Conforme Bernardo *et al.* (2011), as perdas possíveis são: perdas por percolação, perda por evaporação e arrastamento do vento e perda por vazamento no sistema de condução da água. Dessa forma, segundo os autores, para alcançar o êxito na agricultura irrigada, é necessário o manejo adequado de todos os fatores que interferem no desenvolvimento da cultura.

Para Andrade e Borges Júnior (2008), o método de irrigação ideal é aquele que facilita o aumento da produtividade das culturas, melhora a qualidade dos produtos e garante a rentabilidade adequada à atividade agrícola, com o menor dano possível ao meio ambiente.

Conforme Mantovani *et al.* (2012), a escolha do sistema de irrigação mais adequado depende de uma série de fatores, tendo como destaque o tipo do solo, a topografia, o tamanho da área, os fatores climáticos e a capacidade de investimento do produto. Levando sempre em consideração a necessidade de otimizar a utilização da água, uma vez que a agricultura exige um alto volume.

Outro fator importante no tocante a eficiência do uso da água é a uniformidade de aplicação de água na superfície do solo (Mantovani *et al.*, 2012). A uniformidade de distribuição de água é definida como a medida de uniformidade com qual a água de irrigação é distribuída em diferentes áreas em um campo (Faccioli, 2002). A uniformidade de distribuição de água em áreas irrigadas influencia diretamente o manejo, a qualidade, a eficiência e o custo da irrigação, assim como o rendimento da cultura no campo. Uma baixa uniformidade de distribuição de água faz com que algumas zonas recebam menos água que a quantidade necessária, o que pode acarretar prejuízos para o desenvolvimento das plantas (Santos *et al.*, 2003).

Portanto, o conhecimento das características do funcionamento dos sistemas de irrigação é um aspecto fundamental que não pode ser negligenciado na escolha do método de irrigação a ser utilizado, uma vez que influencia no manejo de irrigação.

Conforme Mantovani *et al.* (2012), no Brasil a situação do manejo de irrigação tem avançado nos últimos anos, mas ainda encontra-se incipiente, onde os conhecimentos técnicos associados ao manejo são aplicados em casos isolados e minoritários. Para os autores o que encontramos hoje são sistemas de irrigação cada vez mais modernos que são manuseados por usuários que não sabem ao certo a quantidade de água a aplicar e o tempo de irrigação.

Os fatores que contribuem para situação atual no Brasil é o custo da água, onde na maioria das situações não custa nada ao produtor irrigante, situação atual do perímetros irrigados de Sergipe; o valor da energia elétrica, normalmente, não é tão alto, como é o caso do Perímetro Irrigado Porção da Ribeira, até o ano de 2015 era custeado 100% pelo estado e a partir de 2016 o agricultor paga 50% desse valor; a falta de informações técnicas e/ou consultoria especializada que forneça as opções de manejo de irrigação e a falta de metodologias acessíveis de modo que facilite a sua adoção.

A determinação de quando irrigar e a quantidade de água a ser aplicada pode ser feita através do monitoramento da planta, do solo ou do clima. O monitoramento da planta é o controle ideal do ponto de vista científico, mas as implicações operacionais dificultam sua utilização no campo. O uso de medidas da umidade do solo possui problemas de disponibilidade de equipamentos que associem precisão, tempo de resposta e operacionalidade, em razão da necessidade de medidas periódicas e representativas do teor de água. Já a metodologia de monitoramento do clima vem sendo a mais utilizada em função do uso de medidas de variáveis climáticas que permitem estimar a evapotranspiração da cultura a ser irrigada, possibilitando a identificação do momento da irrigação e da lâmina de água necessária (Mantovani *et al.*, 2012).

Existem diversos métodos de irrigação disponíveis que são capazes de atender as necessidades hídricas das culturas. Será abordado os métodos de irrigação por aspersão e localizada, apresentando suas subdivisões conforme as características de cada método.

2.5.1 Irrigação por aspersão

A irrigação por aspersão consiste em um método de aplicação de água às plantas simulando uma precipitação natural (Mantovani *et al.*, 2012; Faccioli, 2002). Ocorre por meio de dispositivos aspersores, cuja função é pulverizar o jato de água que sai das tubulações

(Faccioli, 2002; Andrade e Borges Júnior, 2008). Segundo Bernardo *et al.* (2011), trata-se de um método que se adapta às mais variadas situações da agricultura irrigada.

Para Mantovani *et al.* (2012), é um sistema muito utilizado em pequenas e médias propriedades, apresentando uma boa uniformidade de aplicação de água, variando entre 75 % a 90%.

Esse sistema sofre muita influência das condições atmosféricas no que diz respeito à intensidade do vento, da temperatura e umidade relativa do ar, afetando de forma significativa o seu desempenho (Bernardo *et al.*, 2011; Barreto *et al.*, 2004). Segundo Mantovani *et al.* (2012), o vento afeta a uniformidade de distribuição dos aspersores e em conjunto com a temperatura e a umidade relativa do ar, influenciam a perda de água por evaporação e arrastamento, comprometendo a eficiência do sistema.

O método de irrigação por aspersão constitui-se de vários sistemas, dentre os quais o sistema de aspersão convencional. Esse sistema de aspersão convencional pode ser utilizado como manejo fixo, semiportátil e portátil (Barreto *et al.*, 2004). Segundo os autores, esse sistema quando operado em posição fixa, o investimento por unidade de área irrigada torna-se maior do que quando utilizado em manejo portátil ou semiportátil.

Os sistemas portáteis, também conhecidos como móveis, são aqueles cujas tubulações de distribuição e as linhas laterais, com seus aspersores, são instaladas sobre o terreno, podendo ser transportados para várias posições de irrigação. Isso se dá devido as tubulações serem desmontáveis (Barreto *et al.*, 2004). Segundo Andrade e Borges Júnior (2008), é recomendado para áreas pequenas e com disponibilidade de mão de obra familiar.

Tem como vantagem a possibilidade de irrigar mais área com o mesmo equipamento e como desvantagem necessitar de mais mão de obra nas operações de irrigação, uma vez que o desmonte e transporte de seus equipamentos é feito de forma manual. Com isso, possibilita também riscos de problemas mecânicos nos componentes transportados (Barreto *et al.*, 2004).

Já os sistemas semiportáteis podem ser considerados variantes dos sistemas portáteis, nos quais as tubulações são fixas e as linhas laterais, com seus aspersores são móveis (Faccioli, 2002). Tem como vantagem diminuir o risco de problemas causados durante as mudanças de posição na área do cultivo, em função da linha principal estar enterrada, facilitando o trânsito na área cultivada. Possui como desvantagem o aumento do custo de aquisição se comparado ao sistema portátil, em virtude da não locomoção da tubulação principal (Barreto *et al.*, 2004).

Os sistemas fixos, por sua vez, são aqueles que tanto a linha principal, como as linhas laterais, funcionam de forma fixa. Dessa forma, as tubulações de distribuição e as linhas laterais necessitam cobrir toda a parcela a ser irrigada (Bernardo *et al.*, 2011). Sua vantagem é economia de mão de obra, uma vez que não ocorre mudanças das tubulações; maior vida útil, em função do pouco desgaste com manuseio e desvantagem o alto custo inicial comparado as outras duas formas de operação (Barreto *et al.*, 2004). Em compensação, poder ser totalmente automatizados, o que reduz sensivelmente a necessidade de mão de obra (Andrade e Borges Júnior, 2008).

Os aspersores utilizados podem ser de pequeno, médio ou grande alcance, sendo que quanto maior for o alcance do aspersor, menor será a sua eficiência de aplicação de água na área (Barreto *et al.*, 2004). Mas em compensação um aspersor de maior alcance, implicará um maior espaçamento entre eles e consequentemente um menor custo (Mantovani *et al.*, 2012). Para os autores deve-se buscar um equilíbrio através de simulações e testes de uniformidade. Segundo Andrade e Borges Júnior (2008), a utilização de aspersores de maior alcance deverá ser empregado para irrigar áreas maiores, principalmente aquelas com cultura de menor valor comercial, que não exigem grande uniformidade de distribuição de água e que cobre totalmente o solo, como pastagem e cana de açúcar.

Uma outra variedade do método de aspersão é o pivô central. Consiste em um sistema que possibilita a irrigação de grandes áreas, com aplicação de água através de aspersores, difusores ou emissores localizados em bengalas (Mantovani, 2012). Possui um alto nível de automação, tornando-se bastante versátil na irrigação em forma de círculo, podendo operar em uma área total ou parte dela, conforme manejo da cultura ou da área (Barreto *et al.*, 2004). Conforme Andrade e Borges Júnior (2008), adaptam-se bem aos mais diversos tipos de cultura, mas em compensação, operam melhor em áreas planas sem obstrução, ou com pequenas declividades.

A eficiência de aplicação de água dos métodos de irrigação por aspersão depende da adequação do projeto, da uniformidade de distribuição, da programação da irrigação e do rigor na operação do sistema (Andrade e Borges Júnior, 2008). Segundo os autores, se corretamente planejados e operados, não causam problemas de escoamento superficial ou erosão. Relatam ainda que dos métodos de irrigação por aspersão existentes, a aspersão convencional encontra-se entre os de menores valores de uniformidade e o pivô central entre os de maior uniformidade.

2.5.2 Irrigação Localizada

É o método de irrigação onde a água é aplicada diretamente sobre a zona radicular das plantas, em pequena quantidade e alta frequência, mantendo o volume de solo com umidade próxima à capacidade de campo (Barreto *et al.*, 2004; Mantovani *et al.*, 2012; Bernardo *et al.*, 2011). Sua área molhada é menor que a área total, o que significa menor quantidade de água evaporada da superfície do solo (Aguiar Neto *et al.*, 2013; Bernardo *et al.*, 2011).

A irrigação localizada é um método de irrigação que possibilita o controle rigoroso da quantidade de água fornecida às plantas. Possui um grande potencial de economia de água e energia, uma vez que a água é aplicada de forma localizada na área explorada pelas raízes. Reduz a incidência de pragas e doenças e o desenvolvimento de plantas daninhas em relação aos outros métodos e possui uma excelente uniformidade de aplicação de água (Barreto *et al.*, 2004; Mantovani *et al.*, 2012). Dessa forma, segundo os autores, esse método apresenta um elevado potencial de uso eficiente da água e de produtividade.

Segundo Andrade e Borges Júnior (2008), a uniformidade de distribuição de água é geralmente alta, acima de 93 %, principalmente em sistemas novos com a utilização de gotejadores autocompensantes. Os sistemas mais antigos possuem valores similares aos outros métodos. As causas da baixa uniformidade são a variação na vazão dos emissores decorrentes de entupimentos. Para os autores, este método permite uma irrigação com menor perda por evaporação direta comparado com o método de aspersão.

Tem como principal inconveniente a grande possibilidade de entupimento dos emissores quando não são realizadas a manutenção preventiva adequada (Mantovani *et al.*, 2012; Bernardo *et al.*, 2011). Em terrenos com pequena declividade a diferença de pressão entre o primeiro e o último emissor pode ser grande, provocando grandes variedades de vazões. Contornando-se o problema com a utilização de emissores autocompensantes, o que implica em aumento de custos (Barreto *et al.*, 2004). Para os autores, uma vez que na irrigação localizada a aplicação de água é pontual, a uniformidade de aplicação dependerá da uniformidade de vazão dos emissores.

Os sistemas de irrigação localizada são normalmente fixos, o que permite total automação das operações, diminuindo os custos de mão de obra na operação (Bernardo *et al.*, 2011; Andrade e Borges Júnior, 2008). Permitem a aplicação de fertilizantes através da água de irrigação, com potencial aumento da produtividade das culturas, mas com perigo de contaminação do solo e da água subterrânea. Quanto à eficiência de aplicação de água,

normalmente, os métodos de irrigação localizada apresentam valores maiores que os de irrigação por aspersão (Andrade e Borges Júnior, 2008).

Os sistemas de irrigação localizada são classificados em dois tipos: gotejamento e microaspersão. O tipo de solo e a cultura a ser irrigada são quem normalmente decidem o tipo de irrigação localizada que deve ser empregada (Andrade e Borges Júnior, 2008).

O gotejamento é o método em que a água é aplicada através de pequenos orifícios, denominados gotejadores, em determinados pontos da cultura, através dos quais a água escoar após ocorrer uma dissipação de pressão ao longo da rede. As vazões são normalmente pequenas, variando de 2 a 20 litros por hora (Mantovani *et al.*, 2012).

Existe basicamente dois tipos de gotejadores, os de labirinto e os de compensação de pressão. Os de labirinto são mais baratos, duráveis e costumam entupir menos. Os autocompensantes são dotados de um mecanismo que mantém a mesma vazão no gotejador para diferentes pressões e costumam ter durabilidade reduzida (Andrade e Borges Júnior, 2008). Conforme os autores, o uso do método de gotejamento tem-se expandido consideravelmente nos cultivos de hortaliças, principalmente naquelas que não toleram o molhamento das folhagens ou frutos.

Uma variação da utilização desse método é o gotejamento subsuperficial, no qual toda a rede é enterrada, inclusive as laterais de irrigação. As vantagens por optar por um sistema totalmente enterrado são: menor evaporação da água pela superfície do solo, menor quantidade de plantas daninhas nas regiões semiáridas, menor umidade e consequentemente menos problemas de doenças. O grande problema dessa modalidade é conseguir detectar o entupimento dos gotejadores (Andrade e Borges Júnior, 2008).

A microaspersão é o método em que a água é distribuída através dos emissores, chamados de microaspersores, através dos quais a água é aspergida na superfície do solo próximo das plantas. Possui vazões pequenas variando de 20 a 150 litros por hora (Mantovani *et al.*, 2012).

Os microaspersores são semelhantes aos aspersores, porém seu tamanho reduzido faz com que lancem pequenos jatos de água. A distribuição da água é feita através de braço oscilante ou de placa defletora. O braço oscilante, possui uma parte móvel chamada de bailarina. A bailarina define o raio de alcance e o padrão de distribuição de água, conforme a sua concepção hidráulica. Já os de placa defletora não possuem partes móveis e distribuem a água em diversos

padrões conforme o desenho da sua superfície defletora, por exemplo 180° ou 360° (Barreto *et al.*, 2004).

Os sistemas de microaspersão costumam ser de manutenção mais fácil do que os de gotejamento, principalmente se comparado aos de gotejamento subsuperficial (Andrade e Borges Júnior, 2008). Conforme os autores, culturas de baixo porte, como hortaliças, os microaspersores podem sofrer a influência do vento, podendo afetar a uniformidade da distribuição da água. Nesse método a evaporação direta da água do microaspersor e da superfície do solo também é maior, comparado ao gotejamento, principalmente em locais de clima seco.

Para Andrade e Borges Júnior (2008), o manejo da irrigação nos métodos de irrigação localizada é o mais simples e preciso de todos. A quantidade de água requerida pela cultura pode ser aplicada com boa uniformidade e as perdas por percolação são normalmente pequenas.

2.6 Um breve estado da arte de sistemas de irrigação automatizados

A irrigação automatizada existente no mercado é basicamente, um sistema em que culturas são irrigadas em dias e horários pré-programados, com tempo de funcionamento definido para atender às necessidades da vegetação.

Um dos modelos existentes no mercado é o temporizador de irrigação, que permite ligar e desligar o sistema em um tempo pré-programado. Modelos mais avançados permitem ciclos de irrigação em um mesmo dia e escolha dos dias da semana para funcionamento, outros permitem que a área seja dividida em setores de irrigação para proporcionar um melhor controle da lâmina d'água (Santos, 2009). Possuem um custo médio, em 2017, de R\$ 600,00 (seiscentos reais) por controlador e segundo Santos (2009), estes controladores são pouco eficientes por não verificar se a quantidade de água aplicada foi necessária, uma vez que não são sensíveis a alterações climáticas que influenciam na quantidade de água a ser aplicada para cada cultura.

Outro produto também existente no mercado é o Irrigâmetro, um aparelho evapo-pluviométrico para ser utilizado no manejo da irrigação, visando otimizar o uso de água. Desenvolvido pela Universidade Federal de Viçosa, este equipamento apresenta grande potencial de uso na agricultura irrigada, pois fornece resposta às duas perguntas básicas do manejo de irrigação: quando e quanto irrigar. Assim, o irrigante não precisa ter conhecimentos técnicos especializados sobre irrigação (Tagliaferre *et al.*, 2012). Possui em 2017 um custo de R\$ 2.590,00 (dois mil quinhentos e noventa reais).

Seu funcionamento é todo manual, onde o momento de irrigar e o tempo de irrigação são definidos pela análise visual do agricultor perante o deslocamento de uma coluna de água dentro de um tubo do Irrigâmetro, tendo como referência duas escalas graduadas definidas e instaladas manualmente ao lado desse tubo (Pinto, 2008).

A operação do sistema de irrigação também é manual, onde o agricultor aciona o sistema no tempo sugerido pelo Irrigâmetro. Esse procedimento leva a necessidade do agricultor estar próximo ao sistema no momento de acionamento e desligamento. Caso isso não ocorra, não será aplicado a lâmina de água adequada para a cultura (Pinto, 2008).

Dessa forma, Pinto (2008), em sua tese de doutorado, desenvolveu e implementou um sistema de entrada de dados e controle automático do Irrigâmetro. Utilizando um microcontrolador PIC, permitiu sensoriar o nível de água em um Irrigâmetro, definindo a lâmina de água evapotranspirada e medir a lâmina de água precipitada. Com os dados coletados o sistema aciona o equipamento de irrigação e define o tempo de funcionamento. Foi encontrada uma dispersão entre os valores medidos na coluna de água do Irrigâmetro, visto que utilizou-se do conversor analógico digital, interno ao microcontrolador, que apresentou, em sua saída, um valor de tensão não linear ao valor da grandeza a ser determinada.

O trabalho de Pinto (2008) automatizou o processo de leitura do Irrigâmetro, mas segundo Tagliaferre *et al.* (2012), este equipamento possui problemas em dias de chuva, uma vez que a precipitação pluvial altera o nível de água no evaporatório do equipamento. O processo de restituição do nível original ocorre de forma manual e deve ocorrer logo após o término da chuva, gerando a necessidade de um profissional estar presente próximo ao equipamento para a realização desse procedimento.

Souza (2001), em sua dissertação de mestrado, desenvolveu um sistema em Delphi, para ser utilizado em computadores, com o intuito de implementar controle de irrigação. No programa, o usuário configurava o início da irrigação nos três períodos do dia (manhã, tarde e noite) e a partir daí o software controlava o acionamento das válvulas solenoides através da porta paralela do computador. O trabalho foi conduzido no campo experimental do Departamento de Engenharia Rural, em três áreas retangular de 15,6m x 1,25m, obtendo bons resultados referente a execução das funções do software.

Macedo *et al.* (2010) produziram um trabalho que teve como objetivo avaliar o desempenho de um sistema de irrigação automatizado através da tensão de água no solo. O acionamento da motobomba ocorria quando a tensão da água na zona radicular da cultura

atingisse os níveis pré-estabelecidos para cada tratamento. O sistema automatizado apresentou deficiência em alguns aspectos, provocando a aplicação de água em déficit e em excesso, o que prejudicou o rendimento da cultura.

Giacomelli (2011), em sua dissertação de mestrado desenvolveu um equipamento, utilizando um microcontrolador PIC, capaz de calcular o tempo de irrigação necessário a partir da informação da evapotranspiração ocorrida no dia anterior. Através de botões era feito a inserção do valor da evapotranspiração obtidos de estações meteorológicas e a partir daí o sistema controlava o fluxo de água no processo de irrigação. Os resultados indicaram uma economia de água e energia elétrica em torno de 60% e o desenvolvimento da cultura na área do sistema equivalente ao da área de testemunha.

Carvalho (2011), desenvolveu em sua dissertação de mestrado rotinas de programação, utilizando um controlador lógico programável (CLP), para controle de irrigação com o intuito de comparar a metodologia baseada no uso de temporizador com a de CLP. As rotinas de programação desenvolvidas utilizavam de informações oriundas de estações meteorológicas e da estimativa da evapotranspiração. Os resultados obtidos durante os testes mostraram a confiabilidade do uso do controlador lógico programável na execução da lógica de controle e na atuação da irrigação, bastando para isto a disponibilização das informações das variáveis do clima.

Guimarães e Bauchspiess (2012), utilizando um microcontrolador arduino, desenvolveram um hardware e um software para realizar controle de irrigação, onde era possível a programação dos horários, frequência e tempo de aplicação de água. O sistema permitia o desligamento da irrigação quando detectado a presença de chuva. Em laboratório os módulos desenvolvidos funcionaram de forma estável, mas o equipamento não foi testado em campo.

Queiroz *et al.* (2013), desenvolveu um circuito eletrônico, de baixo custo, para o manejo automático de sistemas de irrigação em casas de vegetação. O controlador foi projetado para acionar o sistema a partir de uma variação definida no nível de água de um tanque de evaporação. Alguns problemas foram encontrados pelos autores, desde a interferência externa por animais, problemas no acionamento do sistema de irrigação e quedas de energia elétrica. Mas, os resultados mostraram que o protótipo tem potencial para utilização no manejo automático da irrigação em casas de vegetação, podendo ser adaptado para o cultivo no campo.

Reis *et al.* (2015), utilizando a plataforma arduino, desenvolveram um protótipo para

controle de irrigação. O sistema foi integrado a uma maquete que simulava um canteiro de uma horta. O sistema através de um sensor realizava a leitura da umidade do solo e comparava com um valor definido como um padrão ideal. Uma vez a umidade fora do valor adequado a válvula solenoide ligava o sistema de irrigação que permanecia ligado até a umidade do solo atingir o valor definido no sistema. O sensor utilizado media a umidade do solo através da alteração da resistência elétrica entre dois pontos do solo, em uma profundidade de 4 cm, e exigia uma calibração inicial antes da sua utilização. Os resultados indicaram a viabilidade de implementações voltadas a automação de irrigação utilizando a plataforma Arduino.

Como foi observado, já existem diversas propostas comercializadas no mercado e desenvolvidas na área acadêmica que contribuem com o processo de irrigação, mas em nenhuma delas conseguem de forma independente, sem interação humana, definir quando e quanto irrigar; e operar o sistema de irrigação, diferentemente da proposta desse trabalho.

2.7 Perímetro Irrigado Porção da Ribeira

A região do agreste de Itabaiana, estado de Sergipe, vem desenvolvendo-se no setor hortícola devido à existência de perímetros irrigados, que permitem cultivos sob manejo intensivo dos solos e produção durante todo o ano (Melo *et al.*, 2009).

O perímetro Porção da Ribeira, fundado em 1987, possui agricultura predominantemente familiar e tem apresentado dificuldades na gestão socioeconômicas e ambientais, além do elevado consumo de água e pressão sobre os recursos hídricos na bacia hidrográfica do Rio Traíras (Silva, 2016). Segundo o autor, esse perímetro demanda 77% do consumo total de água do seu reservatório.

Os agricultores do perímetro irrigado Porção da Ribeira não pagam pela água que utilizam e custeiam apenas uma parcela da energia elétrica, referente ao bombeamento da água, gasta no sistema de irrigação. A Companhia de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Irrigação de Sergipe (COHIDRO) assume o valor de 50% da energia gasta e a outra metade é dividida pelos agricultores. A quantia é proporcional ao número de aspersores que cada agricultor possui em sua propriedade no projeto original do perímetro. Apesar desse sistema de irrigação não ser mais utilizado, hoje o sistema atual é por microaspersão, é a única referência que a COHIDRO possui para cobrar dos agricultores. Dessa forma, acredita-se que devido a planta do perímetro está desatualizada, muitos agricultores pagam um valor menor do que deveriam.

É comum observar no perímetro irrigado Porção da Ribeira a ausência do controle do uso da água, ocasionando aplicações excessivas, com desperdício de água e energia elétrica. Uma vez que a utilização de práticas adequadas de irrigação possibilitaria o aumento da produtividade e melhorariam a qualidade dos produtos agrícolas, minimizando o uso da água e preservando os recursos hídricos (Oliveira *et al.*, 2008).

O perímetro de irrigação Porção da Ribeira, dentre as áreas de irrigação inseridas pelo Governo Estadual, é um dos mais representativos em termos de volume de produção e comercialização de hortaliças (Lopes e Mota, 1997). Das hortaliças comercializadas a que mais se destaca é a batata doce, segundo Carvalho e Costa (2011), isso ocorre em virtude da mesma ser comercializada semanalmente em municípios sergipanos, baianos e alagoanos. É distribuída em estados nordestinos, como Piauí, Maranhão, Pernambuco e Ceará; e para a região Sul, especialmente o Rio Grande do Sul em função do abastecimento de indústrias doceiras. Outro fator de destaque da batata doce é por representar uma boa alternativa de renda, especialmente pelo baixo custo de produção e por possuir um ciclo de 90 a 120 dias, o qual propicia um fluxo regular de capital na produção (Melo *et al.*, 2009).

Conforme o IBGE, o município de Itabaiana é o maior produtor de batata doce do estado de Sergipe, com uma produção anual, em 2017, de 23.080 toneladas, equivalente a 56,47% da produção do estado (IBGE, 2018).

Segundo Melo *et al.* (2009), a produtividade da batata doce no perímetro irrigado Porção da Ribeira, município de Itabaiana, está acima da média nacional, possibilitando uma lucratividade em torno de 89% de taxa de retorno, do capital investido em 3 ciclos produtivos por ano, em 1 hectare, proporcionando uma boa rentabilidade do capital investido, além de promover a ocupação do homem no campo.

Além da batata doce, são cultivados alface, cebolinha, coentro, pimentão, tomate, couve, amendoim, berinjela, feijão e vagem; produtos esses a serem comercializados em Sergipe e nos estados vizinhos (Silva, 2016).

3 METODOLOGIA

O presente projeto foi desenvolvido em três fases: A primeira fase tratou do desenvolvimento e calibração dos dispositivos necessários para o cálculo da evapotranspiração, junto ao sistema de irrigação; a segunda fase referiu-se aos testes e aplicação do sistema em uma área experimental; e a terceira tratou da realização de atividades educativas, em uma comunidade de agricultura familiar, onde foi abordado, através de palestras, a importância do manejo de irrigação.

3.1 Delimitação e caracterização da área de estudo

A pesquisa foi realizada em quatro locais, sendo os dois primeiros correspondentes a primeira fase do projeto e os demais a terceira e quarta fase respectivamente. O primeiro local foi o laboratório de eletrônica digital do Instituto Federal de Sergipe (IFS), Campus Aracaju (Figura 1). Nele foram confeccionados todos os dispositivos necessários para o desenvolvimento da estação meteorológica automática, desde a parte de hardware e software, como também o desenvolvimento do sistema de irrigação automatizado.

Figura 1 – Laboratório de eletrônica digital do IFS – Fase 1 da pesquisa



Fonte: Autor, 2018

O segundo lugar foi uma casa de vegetação, presente na Universidade Federal de Sergipe (UFS), Campus São Cristóvão, latitude 10° 54' 52'' sul e longitude 37° 10' 60'' oeste, Figura 2, onde foi realizada a calibração dos dispositivos meteorológicos desenvolvidos.

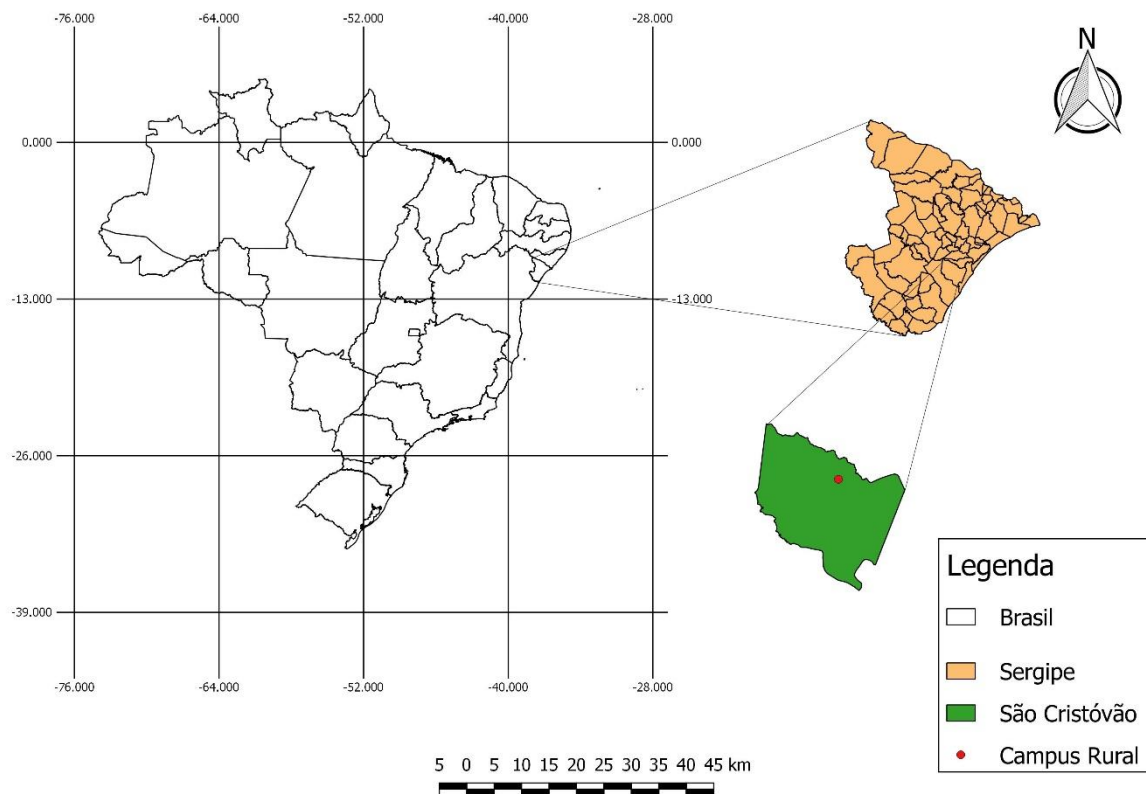
Figura 2- Casa de Vegetação da UFS – Fase 1 da pesquisa



Fonte: Autor, 2017

O terceiro deles foi o Campus Rural da Universidade Federal de Sergipe, localizado no município de São Cristóvão, Sergipe, a 15 km de Aracaju, em solos de tabuleiros costeiros, com coordenadas geográficas de Greenwich 10° 19' S de latitude, 36° 39' O de longitude, com altitude de 20 m acima do nível do mar (Figura 3).

Figura 3 - Campus Rural da UFS em São Cristóvão – Fase 2 da pesquisa



Fonte: Autor, 2018

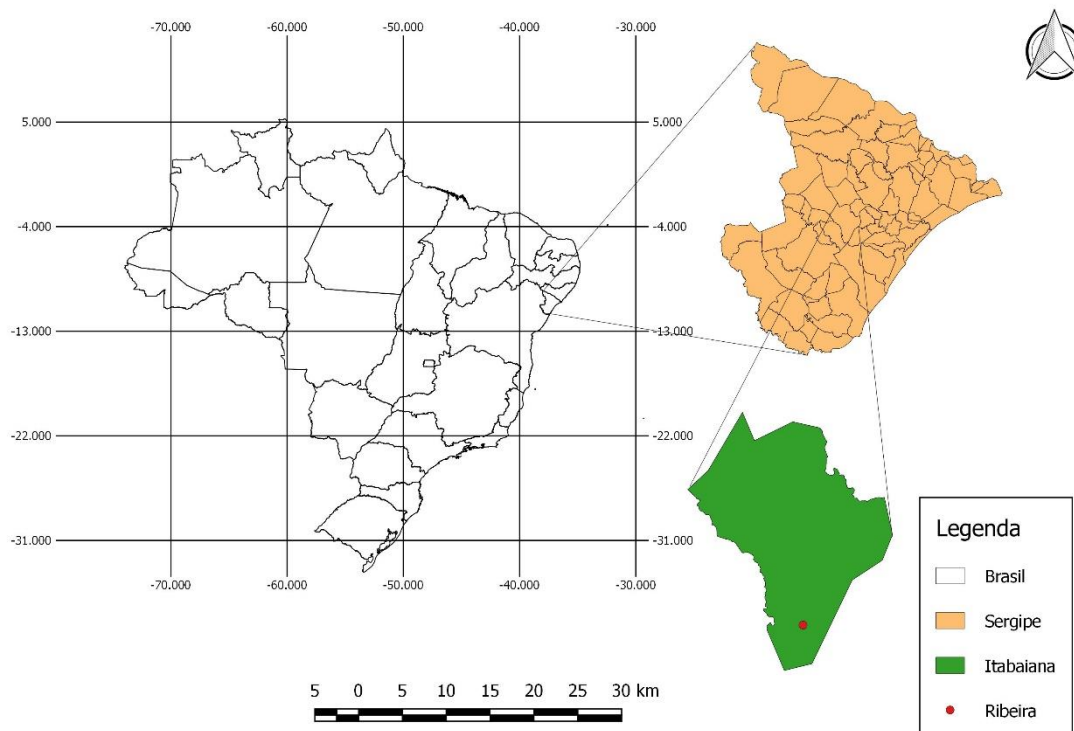
A região possui clima, de acordo com a classificação de Koppen, do tipo As', tropical chuvoso com verão seco e pluviometria em torno de 1200 mm anuais, com chuvas concentradas nos meses de abril a setembro, com temperatura média anual de 22° C (Santos *et al.*, 2015). E umidade relativa em torno de 76%. O solo do local é classificado como Argiloso Vermelho Amarelo com relevo plano a suavemente ondulado (Alves, 2014).

Trata-se de uma fazenda experimental do Centro de Ciências Agrárias Aplicadas (CCAA), que tem como função dar suporte às atividades práticas de ensino, pesquisa e extensão dos cursos de graduação e pós-graduação das Ciências Agrárias e áreas afins. No local é possível contar com o auxílio de máquinas e implementos agrícolas.

Possui três tipos de sistema de irrigação: aspersão, microaspersão e gotejamento, onde através deles são desenvolvidas diversas pesquisas com variadas culturas, como por exemplo: banana, café, uva, milho, entre outros.

O quarto local foi o perímetro irrigado Porção da Ribeira, projeto de irrigação pública estadual, sem intervenção fundiária, localizado na zona agreste do estado de Sergipe, latitude 10° 47' 5'' sul, longitude 37° 24' 44'' Oeste, no município de Itabaiana-SE. Distanto 50 km de Aracaju e 13 km da sede municipal (Figura 4).

Figura 4 - Porção da Ribeira (Itabaiana-SE) – Fase 3 da pesquisa



Fonte: Autor, 2018

O clima da região, de acordo com a classificação de Koppen, é tropical com verão seco (As), com temperatura média anual de 27,7° C, precipitação média de 1143 mm e umidade relativa 47,2% (COHIDRO, 2018). O período de chuvas corresponde aos meses de maio, junho, julho e agosto, com deficiência hídrica em quase todo ano, principalmente na primavera e verão (Santos, 2013).

O projeto de irrigação é composto por uma barragem de terra, no rio Traíras, com 26 metros de altura, 800 metros de extensão, com um reservatório de acumulação de 16,5 milhões de metros cúbicos, com um sistema de irrigação por microaspersão que atinge 1100 ha de área irrigável, divididos em 466 lotes, com predomínio de lotes com menos de 5 hectares de agricultores familiares (COHIDRO, 2018). A Figura 5 demonstra a barragem do rio Traíras que é utilizada para retirada de água para irrigação das culturas do perímetro.

Figura 5 - Barragem de terra no rio Traíras



Fonte: Autor, 2016

O princípio para determinação do tempo de irrigação de cada cultura está fundamentado nos critérios estabelecidos por cada agricultor através de suas experiências. Dessa forma, são eles que determinam o tempo de irrigação para as culturas em suas propriedades, não havendo interferência por parte da COHIDRO. A Figura 6 ilustra uma cultura utilizando o sistema de irrigação por microaspersão em uma propriedade no Perímetro irrigado Porção da Ribeira.

Figura 6 - Cultura sendo irrigada por microaspersão



Fonte: Autor, 2016

O quadro 1 apresenta um resumo dos procedimentos presentes em cada fase da metodologia e os respectivos locais utilizados.

Quadro 1 – Procedimentos presentes em cada fase do projeto e seus respectivos locais

Fases	Procedimentos	Locais
Fase 1	Desenvolvimento e calibração dos dispositivos necessários para o cálculo da evapotranspiração.	Laboratório de eletrônica digital do IFS e casa de vegetação da UFS.
Fase 2	Testes e aplicação do sistema em uma área experimental.	Campus rural da UFS.
Fase 3	Realização de atividades educativas em uma comunidade de agricultura familiar.	Perímetro irrigado Porção da Ribeira

Fonte: Autor, 2018.

3.2 Métodos e técnicas

3.2.1 Desenvolvimento da estação meteorológica automática

Os dispositivos foram desenvolvidos com o apoio do laboratório de eletrônica digital do Instituto Federal de Sergipe. Foram utilizados componentes eletrônicos, eletromecânicos e mecânicos de baixo custo e a calibração foi realizada através da análise de regressões linear. Foi empregado o coeficiente de correlação (r) para quantificar a direção e intensidade da relação entre as variáveis em um diagrama de dispersão; o índice de concordância de Willmott (d) para indicar a precisão dos valores preditos (variável Y) em relação aos observados (variável X); o índice de desempenho (c), proposto por Camargo e Sentelhas (1997), para medir a confiança ou desempenho do método ou modelo utilizado; e o coeficiente de determinação (R^2) para constatar o quanto o modelo consegue explicar os valores observados.

A estação meteorológica foi desenvolvida para ser eletronicamente automatizada na leitura e registro dos dados das variáveis meteorológicas. O desenvolvimento dos dispositivos imprescindíveis para o cálculo da evapotranspiração necessitou da construção de alguns elementos, da adaptação de sensores e de elementos sensitivos, por meio da utilização de componentes mecânicos, eletrônicos ou eletromecânicos. Além da interface desses elementos com a plataforma computacional, condicionamento de sinal, transmissão e armazenamento dos dados. Desse modo, foi possível coletar os sinais, convertê-los na forma digital, processá-los por um microcontrolador, estes ainda foram armazenados em um dispositivo de memória para análise posterior.

Para isso foi utilizado um microcontrolador do tipo Arduino, modelo Uno, um Raspberry PI, segunda geração, e elementos sensitivos para leitura dos dados climáticos. As variáveis são lidas e armazenadas, a cada minuto, em um banco de dados presente no Raspberry.

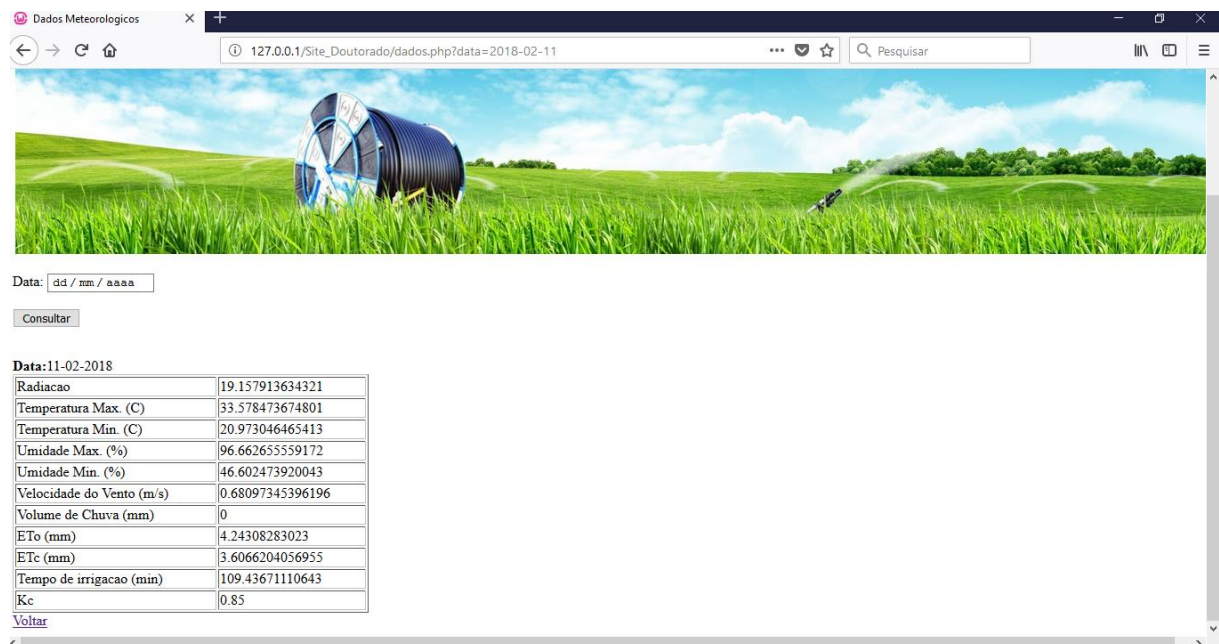
A base de dados pode ser obtida através de uma conexão ao Raspberry utilizando qualquer equipamento que conecte a uma rede sem fio e acesse páginas WEB (Figuras 7 e 8). Uma outra possibilidade é através de um display de cristal líquido (LCD) presente no equipamento que permite a exibição dos últimos valores lidos.

Figura 7 – Página WEB do sistema



Fonte: Autor, 2018.

Figura 8 – Página WEB para consulta dos dados

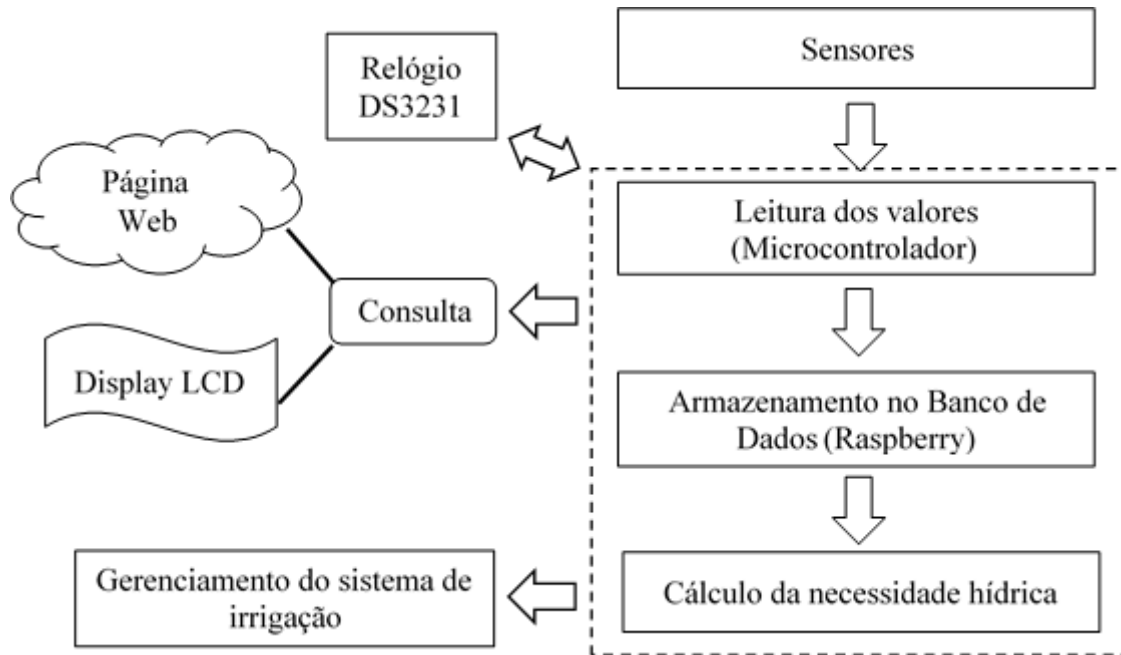


Fonte: Autor, 2018.

Para que fosse possível a leitura das grandezas, a cada minuto foi utilizado um relógio integrado ao sistema. O relógio é composto por um cristal de quartzo de 32 KHz e um circuito

integrado denominado DS3231. Este dispositivo incorpora uma entrada de bateria que mantém a data e hora quando a alimentação principal do dispositivo é interrompida. O DS3231 é um RTC (Relógio de tempo real) com comunicação serial através do protocolo I2C que oferece dois alarmes programáveis, onde é possível gerar uma interrupção no sistema por segundo, minuto, hora e data. A Figura 9 representa a arquitetura do sistema proposto.

Figura 9 – Arquitetura do sistema proposto

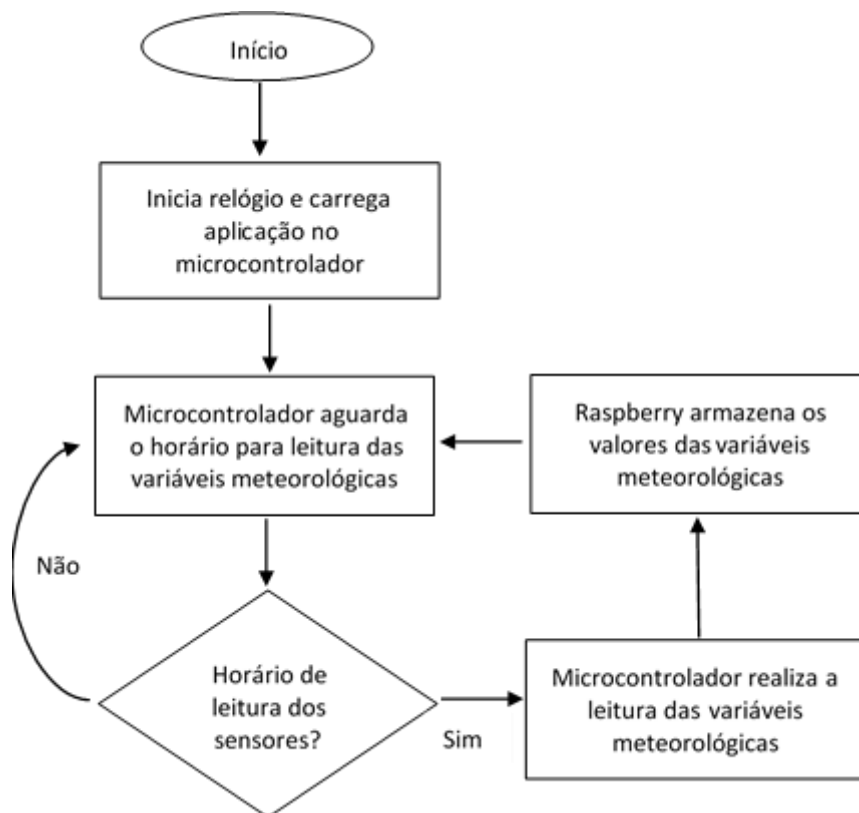


Fonte: Autor, 2018.

A arquitetura apresentada na Figura 9, caracteriza-se como um sistema embarcado, uma vez que é uma arquitetura de hardware e software projetada para desenvolver funções específicas predefinidas.

O primeiro alarme do RTC foi programado para interromper o sistema a cada minuto. Nesse instante são lidos, através de uma rotina em linguagem C implementada no microcontrolador (Apêndice B), os valores de temperatura, umidade relativa, radiação solar e calculada a velocidade do vento e o índice pluviométrico. Os valores das grandezas são enviados pelo microcontrolador para o Raspberry através de uma conexão de rede ethernet, onde são armazenadas, junto a data e horário da leitura, em um banco de dados utilizando rotinas computacionais na linguagem PHP (Apêndice C). A Figura 10 demonstra as rotinas para leitura das variáveis meteorológicas.

Figura 10 – Fluxograma de leitura das variáveis meteorológicas



Fonte: Autor, 2018

O segundo alarme foi configurado para suspender o dispositivo às nove horas do dia. Nesse caso o microcontrolador aciona uma aplicação, implementada em PHP (Apêndice A), para ser executada no Raspberry que calcula a evapotranspiração do dia anterior, pelo método de Penman-Monteith, utilizando as grandezas armazenadas no banco de dados.

Além do recurso de alarme, o RTC possui um sensor de temperatura integrado que foi utilizado para monitorar a temperatura dentro da caixa de proteção utilizada para abrigar o microcontrolador e o Raspberry.

A escolha do Arduino se deu por se tratar de um microcontrolador de baixo custo, em torno de R\$ 50,00 em 2018, de fácil aquisição e por possuir as características necessárias para atender as necessidades do projeto. Possui 13 portas de conversão Analógico/Digital (A/D) com 10 bits de resolução. Possui portas para utilização do protocolo de comunicação I²C, protocolo síncrono que possibilita a comunicação de diversos dispositivos com uma só conexão, utilizado pelo relógio DS3231 e os sensores de temperatura e umidade relativa. Já o Raspberry, um microcomputador, com baixo custo, por volta de R\$ 200,00 em 2018, com baixo consumo de energia, pequeno (do tamanho de um cartão de crédito), possui os recursos comuns aos

computadores atualmente comercializados e atende perfeitamente as necessidades desse projeto.

Para leitura das variáveis climáticas utilizou-se dispositivos analógicos e digitais presentes no mercado. No higrômetro, termômetro, anemômetro e o pluviômetro trabalhou-se com elementos digitais, já o piranômetro com dispositivo analógico.

Com o intuito de medir corretamente as variáveis meteorológicas, os sensores foram instalados de forma que não houvesse interferências nas leituras por meio de objetos, construções, ou até de outro instrumento, vindo a gerar ruídos de qualquer natureza às leituras dos sensores.

Como a estação meteorológica é um equipamento que fica exposto à chuva, vento, irradiação solar, entre outros fenômenos da natureza, foi projetada utilizando alumínio, aço inox, PVC, polipropileno, entre outros materiais resistentes a intempéries.

Por ser composta por componentes eletrônicos necessita do uso de energia elétrica para o seu funcionamento. A energia elétrica utilizada na estação meteorológica pode ser fornecida de duas formas. A primeira delas é através do uso de fontes de alimentação AC/DC (Figura 11), sendo uma para o arduino (5 a 20 Volts) e uma outra para o Raspberry (5 Volts).

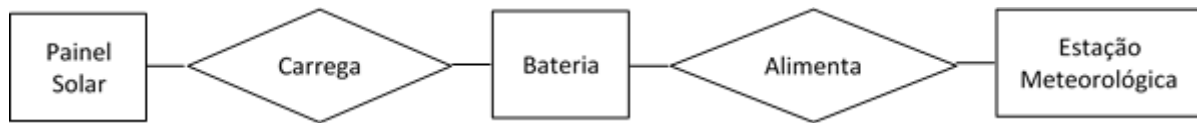
Figura 11 – Fontes de alimentação AC/DC do Raspberry e do microcontrolador arduino



Fonte: Autor, 2018

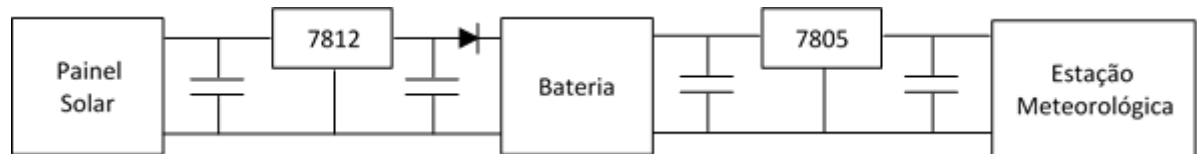
A outra maneira é através do uso de uma bateria conjugada a um painel solar, que através de um circuito condicionador de sinal alimenta o sistema. O painel solar carrega a bateria para suprir a deficiência energética nos períodos noturnos e de baixa insolação. Nos momentos de sol pleno o painel solar alimenta a estação meteorológica e carrega a bateria. Já quando não há energia suficiente nos terminais do painel solar, a alimentação elétrica decorre da bateria. As Figuras 12 e 13 representam o fluxograma do provimento de energia através do painel solar e os circuitos condicionares de sinais, do painel solar e da bateria.

Figura 12 – Fluxograma do provimento de energia através do painel solar



Fonte: Autor, 2018.

Figura 13 – Circuito condicionador de sinais do painel solar e da bateria



Fonte: Autor, 2018.

A fim de reduzir os custos dos equipamentos desenvolvidos, foram utilizados componentes presentes no mercado, cujo valor foi inferior aos produtos atualmente comercializados. O custo do projeto ficou em torno de \$ 270,00 (duzentos e setenta dólares), o que corresponde a 7% do valor de uma estação meteorológica automática comercializada. Para o custo do projeto não foi levado em consideração o valor da mão de obra, apenas o valor dos materiais utilizados.

Contudo, o equipamento em questão foi desenvolvido de forma que fosse facilmente reparado, caso apresentasse algum tipo de problema, devido às falhas de instalação ou uso inadequado. Uma vez que foi construído utilizando componentes embarcados (Arduino e Raspberry), cartão de memória, placas (*Shields*), entre outros, basta que sejam substituídos por um novo com a correta configuração. Além disso, caso algum sensor ou elemento sensível venha a ser danificado também é possível substituí-lo a um custo baixo.

3.2.1.1 Pluviógrafo

O índice pluviométrico de uma determinada localidade é expresso em milímetros, o que representa um volume de água em litros que se distribui uniformemente em 1 metro quadrado de superfície. O modelo confeccionado serve para medir a precipitação de forma líquida, uma vez que as demais formas de precipitação, neve e granizo, são fenômenos de não incidência na região em estudo.

O pluviógrafo desenvolvido é do tipo basculante, formado por uma caçamba dividida em dois compartimentos (Figura 14), dispostos de tal modo que, quando um deles enche, a caçamba esvazia deixando o outro em posição de enchimento.

Figura 14 - Caçambas basculantes



Fonte: Autor, 2017

O eixo da base do sistema basculante foi instalado de forma que ficou no centro das duas caçambas. Sua base foi construída com chapa de aço galvanizado, sem a utilização de solda em sua construção. A opção de não utilizar solda se deu para não causar deformidade na chapa, dificultar o processo de corrosão e facilitar as operações de montagem e desmontagem durante o período de ajustes do equipamento e possíveis manutenções futuras. Conforme Figura 15, o sistema foi montado utilizando cola epóxi, borracha e parafusos.

Figura 15 - Mecanismo de báscula do pluviógrafo



Fonte: Autor, 2017

O mecanismo de funcionamento da balança é baseado no fechamento de um contato magnético instalado na balança do aparelho. Dessa forma, para cada tombamento da balança, um ímã posicionado no seu topo, fecha a chave magnética, *reed switch*, instalada na haste da balança. Assim, quando o sensor magnético é acionado, um sinal elétrico é emitido correspondente a um volume de 0,25 mm de chuva para cada tombamento da balança. Consequentemente, o início da operação do sistema basculante é estabelecido, deixando a balança em posição de receber a primeira parcela de água para então iniciar a contagem dos pulsos.

Os dados são enviados através de um cabo conectado à chave magnética, acoplado à base do pluviômetro que, por sua vez, foi conectado a uma porta digital do microcontrolador Arduino para leitura do sinal elétrico emitido.

Para calibração da balança, com uma resolução de 0,25 mm, foi utilizada a equação proposta por Tubelis e Nascimento (1992), equação 3, onde a altura da chuva acumulada sobre uma superfície (mm) é calculada pela divisão do volume de água coletada pela área de captação.

$$P = 10 \times V / A \quad (3)$$

Onde:

P = precipitação (mm)

V = Volume de água captada (ml)

A = Área da superfície coletora (cm²)

Uma vez a área de captação conhecida, medindo 283,5 cm² e resolução de 0,25 mm, a quantidade de água necessária para uma cavidade da balança registrar um tombamento foi de 7,08 ml. Dessa forma foi utilizado uma pipeta graduada de 10 ml (Figura 16) para calibração das balanças através de parafusos presentes na base do mecanismo do pluviômetro (Figura 15).

Figura 16 - Calibração das básculas utilizando uma pipeta graduada



Fonte: Autor, 2017

Os ajustes dos parafusos para calibração do volume de captação da báscula, foi feito para que o recipiente que está recebendo a água se mova em função do eixo da base do sistema basculante. Elevando o parafuso, o centro de gravidade da báscula se aproximará do eixo, conseqüentemente menos água será necessária para inclinar o mecanismo. Abaixando o parafuso, haverá a troca do centro de gravidade, aumentando a quantidade de água requerida para uma descarga. À vista disso, os dois parafusos foram ajustados de modo que as básculas venham a mediar a mesma quantidade de chuva.

A Figura 16 mostra o processo de calibração das básculas utilizando uma pipeta graduada. Os parafusos de ajustes do volume de água, de cada báscula, podem ser observados na Figura 15. Durante o processo de calibração foi utilizado um nível para assegurar que a base do sistema basculante estivesse nivelada, garantindo que após o processo de calibração as duas básculas medissem o mesmo volume de água.

O equipamento foi submetido a testes de repetição com a pipeta graduada, com o derramamento de água por gotejamento e posteriormente em condições mais severas de intensidade, de forma a assegurar sua acurácia individual.

O coletor de precipitação foi construído utilizando material plástico, com 19 cm de diâmetro, 23 cm de altura, possibilitando uma área de captação de chuva de 283,5 cm² (Figura 17). Um cilindro com um fundo afunilado, denominado funil coletor, faz escorrer a água por ele coletada, até o mecanismo de caçambas basculantes, Figura 15, que alternadamente receberão a chuva coletada. Este coletor foi acoplado a um tubo de PVC de 150 mm que tem a função de sustentar o funil coletor e as básculas, além de protegê-los (Figura 17).

Figura 17 - Pluviógrafo desenvolvido



Fonte: Autor, 2017

O orifício de drenagem do funil coletor foi protegido por uma tela de nylon fina para prevenir a entrada de insetos, materiais que possam ser levados pelo vento ou pela ação de pássaros e eventualmente entupir os condutos ou danificar a sensibilidade do mecanismo basculante.

Uma vez montado o pluviógrafo, Figura 17, o equipamento foi submetido a um teste de precipitação, realizado através da simulação de uma precipitação, com intensidades diferentes, de forma a verificar a precisão do conjunto e a propagação do erro por báscula.

Para isso foi desenvolvido um instrumento com a finalidade de simular diferentes condições de precipitação. Este equipamento consiste de uma garrafa pet conectada a uma torneira que permite o controle do fluxo de água. A água era medida através de uma proveta

graduada e inserida na garrafa pet. Dessa forma, realizou-se diversos ensaios com vazões diferentes, permitindo que fosse possível visualizar o efeito de diferentes volumes de água sendo despejados sobre as básculas em um mesmo intervalo de tempo, simulando dessa forma diferentes intensidades de precipitação.

Antes das medições o equipamento foi nivelado e foi escolhido o volume de 283,2 ml de água para calibração, o que corresponde a 40 operações de descarte das básculas e consequentemente 10 mm de chuva.

Com a vazão controlada, a precipitação era dessa forma simulada montando-se o recipiente com o registro sobre a área de captação do pluviômetro. Foram realizados 15 ensaios com fluxos de água diferentes para constatar o desempenho do equipamento. O tempo decorrido da operação de despejo de água sobre o sistema basculante ficou no intervalo de 5 a 19 minutos.

As características principais desse aparelho são: capacidade de medição ilimitada, boa resistência a corrosão e tela de proteção contra detritos. O pluviógrafo de caçambas basculantes foi construído de forma a atender os critérios de robustez, facilidade de manejo, baixa manutenção, custo reduzido e operação precisa.

3.2.1.2 Piranômetro

O piranômetro foi desenvolvido para medir a irradiância solar global, utilizando um componente eletrônico semiconductor a base de silício, fotodiodo BPW34 da Vishay semicondutores. O BPW34 é um fotodiodo com alta sensibilidade a radiação solar, operando em um espectro luminoso de 430 a 1100 nm, valor esse bem próximo ao equipamento considerado padrão, piranômetro LI200 da LI-COR, que trabalha com espectro luminoso entre 400 a 1100 nm. Além disso, esse fotodiodo possui uma rápida resposta a leitura da radiação solar, pequena dimensão e é indicado para aplicações de alta precisão linear.

O BPW34 é um elemento fotovoltaico, que converte a radiação solar recebida em um valor correspondente a uma tensão em milivolts (mV), semelhante ao princípio de leitura do piranômetro LI-COR.

Para o acondicionamento do sensor foram desenvolvidos dois corpos de instrumento com o intuito de averiguar qual teria, junto ao fotodiodo, uma melhor resposta ao espectro luminoso ao comparar com o equipamento padrão. O primeiro utilizou uma redoma de acrílico transparente, conforme Figura 18, para proteger o sensor de intempéries como vento, chuvas e

poeiras. A redoma foi retirada de um camuflador de câmeras de segurança facilmente obtido no comércio local.

Para sustentação do piranômetro foi utilizado a base do camuflador, retirando os suportes para encaixe da câmera. Na base foi encaixado o fotodiodo através de um mini protoboard e um cabo manga para conexão com o microcontrolador.

Figura 18 - Corpo de piranômetro desenvolvido utilizando camuflador de câmera de segurança



Fonte: Autor, 2017

O segundo, utilizou uma luva de pressão de 32 mm, utilizado para união de eletrodutos de rede elétrica, material facilmente encontrado em lojas de material de construção. No seu topo foi inserido um disco confeccionado de material leitoso, conforme pode ser observado na Figura 19.

Figura 19 - Corpo de piranômetro desenvolvido utilizando luva para eletrodutos de rede elétrica

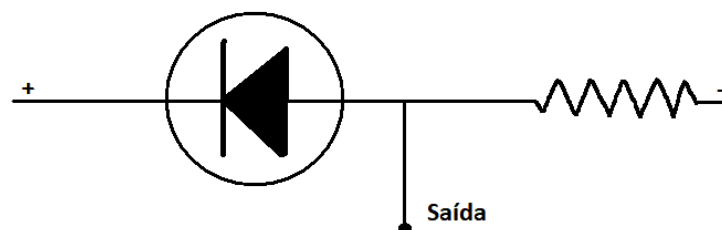


Fonte: Autor, 2017

Os corpos dos instrumentos desenvolvidos foram projetados de forma a garantir uma boa condição de fixação e nivelamento com o plano horizontal, devido ao longo período que estarão fixados e a realização de medidas, independente do ângulo de incidência. Além disso, são de fácil montagem e o material utilizado é resistente às temperaturas as quais estão expostos.

Em ambos os equipamentos confeccionados, para se obter a irradiância solar global, foi coletada a tensão correspondente, proporcional à radiação, em milivolts, no terminal de saída do instrumento. Para isso utilizou-se um condicionamento de sinal através de um divisor de tensão, ao qual se conectou uma resistência em série com os terminais do sensor e foi aplicada uma diferença de potencial de 5 V, conforme pode ser observado na Figura 20.

Figura 20 - Circuito condicionador de sinal utilizado no piranômetro



Fonte: Autor, 2017

A saída da tensão do circuito foi ligada ao sistema de aquisição de dados, microcontrolador, para conversão do sinal analógico em digital. Este dispositivo produz um

sinal digital que representa o sinal analógico. Dessa forma, o fotodiodo envia ao microcontrolador um sinal analógico em milivolts, que é convertido em bits pelo conversor analógico digital, gerando valores entre 0 a 1023 bits.

Para fins de comparação dos resultados obtidos foi utilizado o piranômetro da estação meteorológica Irriplus, modelo E5000, que possui uma resolução de $0,006 \text{ MJm}^{-2}$. A referida estação foi adquirida em janeiro de 2017, sendo inclusive instalada com o propósito de aferir os sensores desenvolvidos no presente trabalho. Assim, os dois protótipos foram instalados próximos do piranômetro da estação Irriplus, para fins de calibração, onde os instrumentos foram colocados a uma altura de 1,5 m do solo, expostos ao sol, do amanhecer ao entardecer.

A instalação se deu para que os raios solares atingissem os sensores em todo o tempo em que o sol estivesse sendo visto na atmosfera, sem a presença de sombras, obstáculos e áreas reflexivas. O local do experimento foi em uma casa de vegetação presente na Universidade Federal de Sergipe, campus São Cristóvão, latitude $10^\circ 54' 52''$ sul e longitude $37^\circ 10' 60''$ oeste.

Os valores da radiação solar foram lidos pelos três equipamentos diariamente, minuto a minuto, de forma sincronizada, em duas fases. A primeira fase correspondeu ao período de 06 a 14 de fevereiro de 2017 e foram anotados 374 registros de radiação por sensor, diversificando dias e horários, uma vez que o princípio de registro foi realizado de forma manual devido à estação da Irriplus exibir os valores (Wm^{-2}) apenas no display e não os armazenar para futura análise. A estação utilizada como padrão, Irriplus E5000, armazena apenas a radiação horária em MJh^{-1} .

Com os resultados obtidos foram traçados gráficos da irradiância medida pelo piranômetro padrão (Wm^{-2}) em função da tensão de saída média nos protótipos (mV). Através da regressão linear foi possível obter as equações de calibração dos protótipos. Para um melhor ajuste do coeficiente angular, próximo de 1, foram substituídos os resistores do circuito, Figura 20, com a expectativa de obter um resultado mais satisfatório.

Repetiu-se o procedimento de leitura da radiação utilizando os três equipamentos, segunda fase, nos períodos de 03 a 10 de março e 5 a 6 de abril de 2017, obtendo 487 registros por sensor, utilizando a mesma metodologia da fase 1.

Nas duas fases, foram coletados valores tanto em dias de céu claro, em sua maioria, quanto na presença de nebulosidade, com o intuito de que os valores coletados se aproximassem o máximo possível da realidade.

3.2.1.3 Termômetro e Higrômetro

A temperatura e a umidade relativa do ar foram medidas utilizando um termo-higrômetro da Sensirion, modelo SHT21. A escolha desse sensor se deu em função da boa precisão e linearidade, baixo consumo de energia, baixo tempo de resposta e pequeno tamanho, o que facilita sua acomodação em pequenos compartimentos de proteção.

Esse sensor, para umidade relativa, possui resolução de 0,04% e acurácia de $\pm 2\%$. Já para temperatura do ar a resolução é de $0,01^\circ$ Celsius e acurácia de $\pm 0,3^\circ$ Celsius. Sua faixa de operação para umidade é de 0 a 100% e para temperatura de -40° a 125° Celsius. É um sensor pré-calibrado, com equação fornecida pelo fabricante. Suas medidas utilizam um sensor do tipo capacitivo para umidade relativa e um semicondutor para temperatura.

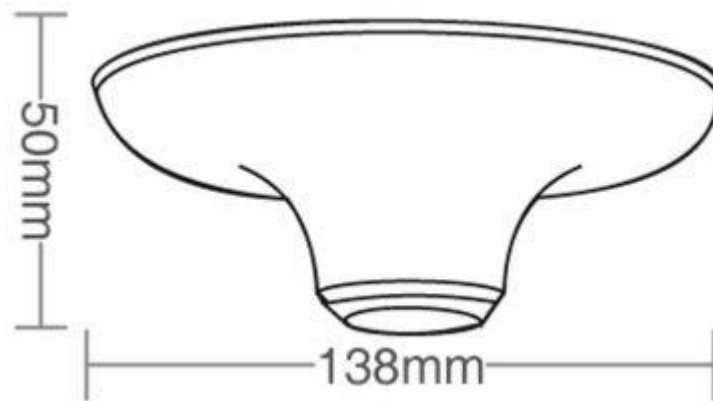
O SHT21 possui sensores individuais de temperatura e umidade relativa do ar, porém no mesmo encapsulamento. Além disso o chip contém um amplificador, conversor analógico digital e uma unidade de processamento digital. Possui saída em formato digital I²C, facilitando a conexão com o microcontrolador.

Para este sensor, não foi necessária a utilização de circuito condicionador de sinais, uma vez que pode ser ligado diretamente ao sistema de aquisição de dados. Foram utilizados os 4 terminais do sensor, tensão 5 Volts, terra (GND) e o pinos SDA e SDL para conexão através do protocolo I²C.

Em conformidade com as normas da Organização Mundial de Meteorologia, os sensores de temperatura e umidade relativa do ar devem estar protegidos contra radiação solar direta, de modo que o abrigo comporte-se como um dissipador de calor, permitindo a passagem de ar pelos sensores. Consequentemente, os valores obtidos devem representar as condições térmicas do local.

Considerando esses requisitos foi confeccionado um abrigo meteorológico construído utilizando 8 plafons de polipropileno, na cor branca, medindo 50 mm de altura por 138 mm de largura, conforme Figura 21.

Figura 21 - Plafon utilizado para confecção do abrigo meteorológico



Fonte: Autor, 2017

A escolha pela cor branca se deu com o intuito de refletir a maior quantidade possível de energia solar. Os plafons foram sobrepostos com espaçamento de 15 mm entre eles, Figura 22, utilizando porcas, arruelas e duas barras galvanizadas roscadas de 210 mm de comprimento e 4 mm de diâmetro. Dessa forma, permitiu-se uma boa ventilação natural por todos os lados, sem a entrada de chuva e radiação solar.

Figura 22 - Abrigo meteorológico desenvolvido para proteção dos sensores



Fonte: Autor, 2017

No centro do abrigo foi inserida uma barra roscada que serve para sua fixação no suporte da estação e inserção dos sensores. Estes foram envolvidos por um filtro poroso de espuma, utilizado em microfones de lapela, com intuito de protegê-lo de poeira, insetos, chuva, ou outro agente que venha a interferir nos resultados. Tomou-se todo o cuidado para a proteção ser colocada de modo a não influenciar as medidas.

Figura 23 - Filtro poroso e sensor SHT21



Fonte: Autor, 2017

Com a finalidade de constatar se o sistema de leitura e armazenamento de dados funcionaria perfeitamente, foi realizado um teste no período de 1 a 8 de fevereiro de 2017. O mesmo consistiu em deixar o equipamento ligado, no local do experimento, com os sensores de temperatura e umidade relativa. O objetivo dessa análise foi apenas averiguar a periodicidade das medidas e encontrar possíveis falhas na coleta de dados que deveriam ser corrigidas antes de se iniciar o processo de calibração.

Para calibração dos sensores foram utilizados o termômetro e o higrômetro da estação meteorológica Irriplus, modelo E5000. O termômetro possui resolução de 0,06° Celsius e acurácia $\pm 0,5^\circ$ Celsius; e o higrômetro resolução de 0,1% e acurácia de $\pm 3,5\%$. Os protótipos foram instalados próximos da estação meteorológica Irriplus, inseridos a uma altura de 1,5 m do solo, a fim de possibilitar uma análise comparativa entre os dados.

O local do experimento foi em uma casa de vegetação presente na Universidade Federal de Sergipe, campus São Cristóvão, latitude $10^\circ 54' 52''$ sul e longitude $37^\circ 10' 60''$ oeste, a mesma utilizada para aferição do piranômetro.

Os valores de temperatura e umidade relativa foram lidos diariamente, minuto a minuto, de forma sincronizada, no período de 09 a 20 de fevereiro de 2017. A estação Irriplus possui a característica de armazenar apenas os valores obtidos de hora em hora, através da média de suas leituras. Diante disso, foi calculada a média dos valores horários da estação desenvolvida, para

as duas grandezas, a fim de que fosse possível a comparação com os dados obtidos pela estação Irriplus.

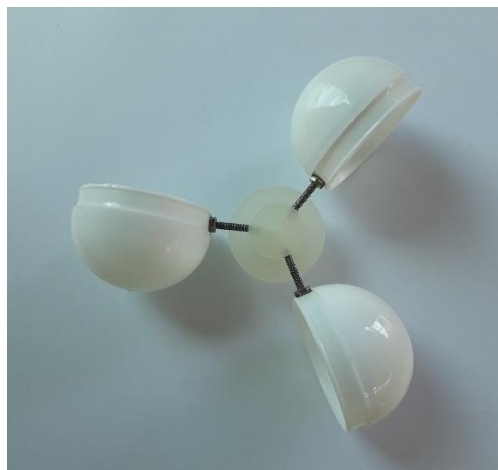
Com os resultados obtidos foram traçados gráficos de dispersão referentes à temperatura e umidade, sendo o eixo das abcissas o sinal dos sensores protótipos e nas ordenadas, o sinal dos sensores de referência. Para um correto funcionamento do protótipo o gráfico deverá mostrar pontos próximo da reta e o coeficiente angular da reta deve ter valor igual ou muito próximo de 1. Além disso, através da regressão linear foi possível obter as equações de calibração dos sensores. Esses procedimentos ocorreram com o intuito de evidenciar a correlação existente entre os sensores, bem como a confiabilidade do equipamento confeccionado.

3.2.1.4 Anemômetro

Com o intuito de medir a velocidade do vento desenvolveu-se um anemômetro de concha. O dispositivo proposto mede a velocidade do vento somente no plano horizontal. O equipamento foi confeccionado com uma parte móvel e um mecanismo contador, em que a velocidade das conchas é proporcional a do vento. O seu princípio de medição consiste na contagem do número de voltas em um intervalo de tempo.

O protótipo foi desenvolvido utilizando três conchas fixadas nas extremidades de três parafusos de inox com 20 mm de comprimento e 3 mm de diâmetro cada um. Os parafusos foram inseridos, espaçados entre si em um ângulo de 120° , em um suporte confeccionado em nylon, conforme Figuras 24 e 25.

Figura 24 - Vista de cima do suporte com as três hastes



Fonte: Autor, 2017

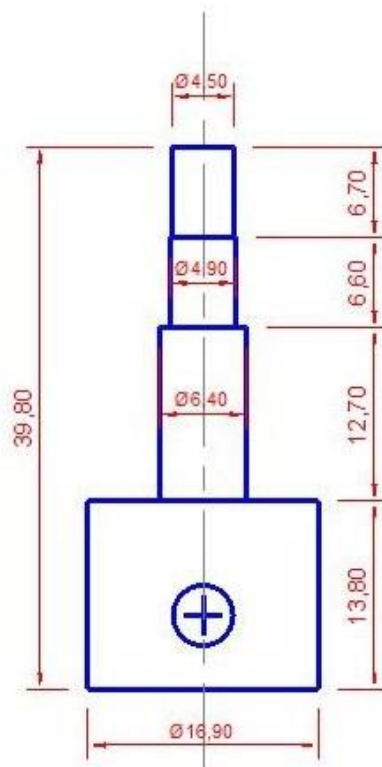
Figura 25 - Concha com parafuso de fixação e suporte em nylon



Fonte: Autor, 2017

O eixo do equipamento foi confeccionado em nylon, com 4 dimensões diferentes, conforme Figura 26. As duas menores dimensões permitem o encaixe no suporte das hastes e em um rolamento respectivamente. O rolamento escolhido possui 16 mm de diâmetro externo, 5 mm de diâmetro interno e 5 mm de altura, permitindo o livre movimento do eixo.

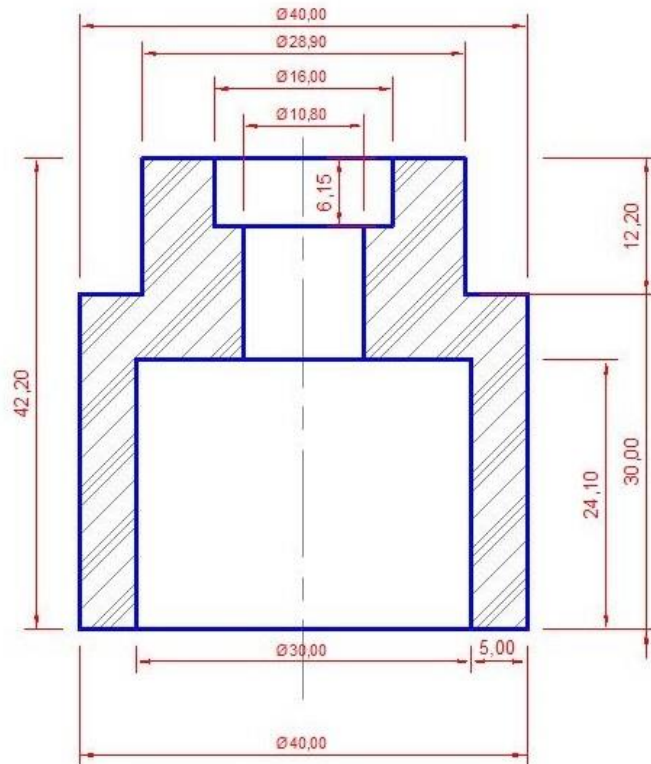
Figura 26 - Eixo do anemômetro



Fonte: Autor, 2017

O corpo do anemômetro, Figura 27, foi desenvolvido na forma de um cilindro, com um furo no centro. No furo foi inserido o rolamento, onde nele passa o eixo que se conecta ao suporte das hastes. O corpo, o eixo e o suporte das hastes foram confeccionados em um torno industrial utilizando o nylon como matéria prima.

Figura 27 - Corpo do anemômetro confeccionado em nylon



Fonte: Autor, 2017

As conchas são de plástico, formato hemisférico, com diâmetro de 47 mm e 34 mm de profundidade. O tamanho dos parafusos fixadores e das conchas tiveram como referência o anemômetro da estação meteorológica Davis. Suas partes côncavas são orientadas no mesmo sentido e, desta forma, a pressão do vento faz com que estas girem sempre na mesma direção junto com o eixo central.

Na parte do eixo mais espessa foi fixado um ímã, de forma que ao girar o eixo, o ímã passava próximo a uma chave magnética, *reed switch*, instalada no corpo do anemômetro e conectado a uma porta do microcontrolador, que foi configurada como entrada, e com um resistor do tipo *pull-up* ativado. Quando o ímã está posicionado sobre o sensor, o contato fecha e desta forma, pulsos são gerados em função da velocidade do vento no anemômetro. A Figura 28 demonstra o anemômetro desenvolvido.

Figura 28 – Anemômetro desenvolvido



Fonte: Autor, 2017

No código desenvolvido para o microcontrolador foi ativada a detecção de borda de descida para o bit da porta que está ligada à chave magnética. Dessa forma, quando o ímã se aproxima da chave magnética, um giro de 360° no anemômetro, gera uma mudança de estado e com isso o programa aciona a rotina de tratamento de interrupção da porta. A rotina foi implementada para contar o número de voltas por um determinado intervalo de tempo e, com isso, calcular a velocidade do vento.

Com o auxílio de um fluxo de ar gerado por um ventilador, efetuou-se a análise comparativa do anemômetro. A calibração consistiu em submeter o protótipo e o anemômetro padrão a um escoamento de ar, controlado por um regulador de fluxo, obtendo velocidades entre 5 a 15 km/h. O processo ocorreu em um ambiente fechado para não ocorrer influência de fluxos externos. Dessa forma, determinou-se a posição, em frente ao ventilador, em que havia menor variação da velocidade do vento.

As leituras padrões das velocidades foram efetuadas utilizando um anemômetro digital, marca Davis, modelo K7911, que possui precisão de ± 3 km/h ou 5%. Para o controle do fluxo do ar, foi utilizado um *dimmer* acoplado ao ventilador.

Para cada velocidade submetida, aguardava-se um período até a velocidade do vento estar estabilizada. Retirou-se o anemômetro de referência e foi colocado o protótipo na mesma posição, para que este fosse atingido pelo mesmo fluxo de ar. Com isso, verificou-se a quantidade de voltas para cada uma das 7 diferentes velocidades trabalhadas. De forma que, para cada velocidade, foram feitas 8 repetições e calculada a velocidade média em períodos de 60 segundos para cada velocidade ensaiada.

Com os dados de velocidade do vento obtidos pelo anemômetro de referência e a quantidade de voltas geradas pelo anemômetro desenvolvido, plotou-se o diagrama de dispersão dos dados da calibração do anemômetro. Utilizou-se, também, da análise de regressão dos dados para gerar a equação de calibração do anemômetro desenvolvido e definição do coeficiente de determinação R^2 para avaliar a qualidade da regressão junto ao coeficiente de correlação.

3.2.2 Cálculo da Necessidade Hídrica

O cálculo da necessidade hídrica foi realizado através da evapotranspiração da cultura referente ao dia anterior, calculado através do método Penman-Monteith, considerado padrão internacional de acordo com o boletim de Irrigação e Drenagem FAO 56 (Allen *et al.*, 1998).

Allen *et al.* (1998), apresenta a equação para o cálculo da evapotranspiração de referência pelo Método de Penman-Monteith (FAO 56) (Equação 4).

$$E_{to} = \frac{0,408\Delta(Rn-G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0,34u_2)} \quad (4)$$

Onde:

E_{to} = evapotranspiração de referência, mm.dia⁻¹.

Δ = declividade da curva de pressão de saturação de vapor, kPa °C⁻¹.

Rn = radiação líquida à superfície da cultura, MJ.m⁻².dia⁻¹.

G = fluxo de calor no solo, MJ.m⁻².dia⁻¹.

γ = constante psicométrica, kPa °C⁻¹.

T = temperatura média do ar, °C

e_s = pressão de saturação de vapor, kPa.

e_a = pressão de vapor atual, kPa.

u_2 = velocidade do vento a dois metros de altura, m.s⁻¹

As rotinas computacionais necessárias para a estimativa da evapotranspiração de referência pela equação de Penman-Monteith, de acordo com a equação 4, sucede o roteiro

descrito pelas equações 5 a 19. Dessa forma, são necessárias informações diárias das variáveis meteorológicas: temperatura máxima ($T_{máx}$, °C), temperatura mínima ($T_{mín}$, °C), Radiação Solar global (R_s , MJ.m⁻².d⁻¹), velocidade média do vento (U_2 , m.s⁻¹), umidade relativa máxima do ar ($UR_{máx}$, %), umidade relativa mínima do ar ($UR_{mín}$, %); e da altitude, latitude e o dia juliano.

O dia juliano (J) corresponde ao número do dia do ano entre 1 para primeiro de janeiro e 365 ou 366 para 31 de dezembro.

A temperatura média do ar (T) é obtida através da média aritmética entre a $T_{máx}$ e $T_{mín}$.

$$T = \frac{T_{máx} + T_{mín}}{2} \quad (5)$$

A pressão de saturação de vapor (e_s) é calculada pela equação que segue:

$$e_s = \left[\frac{e^\circ(T_{máx}) + e^\circ(T_{mín})}{2} \right] \quad (6)$$

Onde a $e^\circ(T_{máx})$ é a pressão de saturação de vapor para temperatura máxima (kPa) e $e^\circ(T_{mín})$ é a pressão de saturação de vapor para temperatura mínima (kPa) expressas pelas equações 7 e 8.

$$e^\circ(T_{máx}) = 0,6108 \cdot \exp\left[\frac{17,27 \cdot T_{máx}}{T_{máx} + 237,3}\right] \quad (7)$$

$$e^\circ(T_{mín}) = 0,6108 \cdot \exp\left[\frac{17,27 \cdot T_{mín}}{T_{mín} + 237,3}\right] \quad (8)$$

Já a pressão de vapor atual (e_a) é determinada através da $UR_{máx}$ e $UR_{mín}$ conforme equação 9.

$$e_a = \frac{\left[e^\circ(T_{mín}) \cdot \frac{UR_{máx}}{100} \right] + \left[e^\circ(T_{máx}) \cdot \frac{UR_{mín}}{100} \right]}{2} \quad (9)$$

E o déficit de pressão de vapor (DPV), expresso pela equação:

$$DPV = e_s - e_a \quad (10)$$

A radiação líquida (R_n) à superfície da cultura é obtida pela diferença do balanço de ondas curtas (R_{ns}) e o balanço de ondas longas (R_{nl}).

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (11)$$

O balanço de ondas curtas (R_{ns}) é calculado por:

$$R_{ns} = (1 - \alpha) \cdot R_s \quad (12)$$

Onde α é o albedo ou coeficiente de reflexão, cujo valor recomendado para a cultura padrão é 0,23 e o R_s é a radiação solar global ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$).

E o balanço de ondas longas (R_{nl}) é obtido pela equação 13.

$$R_{nl} = \sigma \cdot \left[\frac{T_{\text{máx}}^4 + T_{\text{mín}}^4}{2} \right] \cdot (0,34 - 0,14\sqrt{ea}) \cdot (1,35 \cdot \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35) \quad (13)$$

$T_{\text{máx}}$ e $T_{\text{mín}}$ correspondem a temperatura máxima e mínima do ar na escala Kelvin. σ é a constante de Stefan-Boltzman e possui o valor de $4,903 \cdot 10^{-9}$. R_{so} é a radiação solar em dias de céu claro, obtida por:

$$R_{so} = (0,75 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot z) \cdot R_a \quad (14)$$

Sendo z a elevação da estação sobre o nível do mar (m) e R_a a radiação no topo da atmosfera ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$) dada por:

$$R_a = \frac{24 \cdot (60)}{\pi} \cdot G_{sc} \cdot dr \cdot [ws \cdot \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(ws)] \quad (15)$$

Em que, G_{sc} é a constante solar com valor de $0,0820 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{min}^{-1}$; dr o inverso da distância relativa Terra-Sol em radianos; φ a latitude em radianos; δ a declinação solar (radianos) e ws o ângulo horário ao pôr do sol (radianos).

A seguir são apresentadas as equações para os cálculos da distância relativa terra sol (dr), declinação solar (δ) e ângulo horário ao pôr do sol (ws).

$$dr = 1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \quad (16)$$

$$\delta = 0,409 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1,39\right) \quad (17)$$

$$ws = \arccos[-\text{tg}(\varphi) \cdot \text{tg}(\delta)] \quad (18)$$

A declividade da curva de pressão de saturação de vapor (Δ) é obtida a partir da equação 19.

$$\Delta = \frac{4098 \cdot [0,6108 \cdot \exp(\frac{17,27 \cdot T}{T+237,3})]}{(T+237,3)^2} \quad (19)$$

Para o fluxo de calor no solo (G) o boletim da FAO 56 (Allen *et al.*, 1998) recomenda que para períodos diários, G pode ser desprezível, o que foi adotado neste trabalho. Para o valor da constante psicrométrica (γ) foi adotado valores em função da altitude conforme boletim da FAO 56 (Allen *et al.*, 1998).

Tabela 3 - Constante psicométrica (γ) para diferentes altitudes (z)

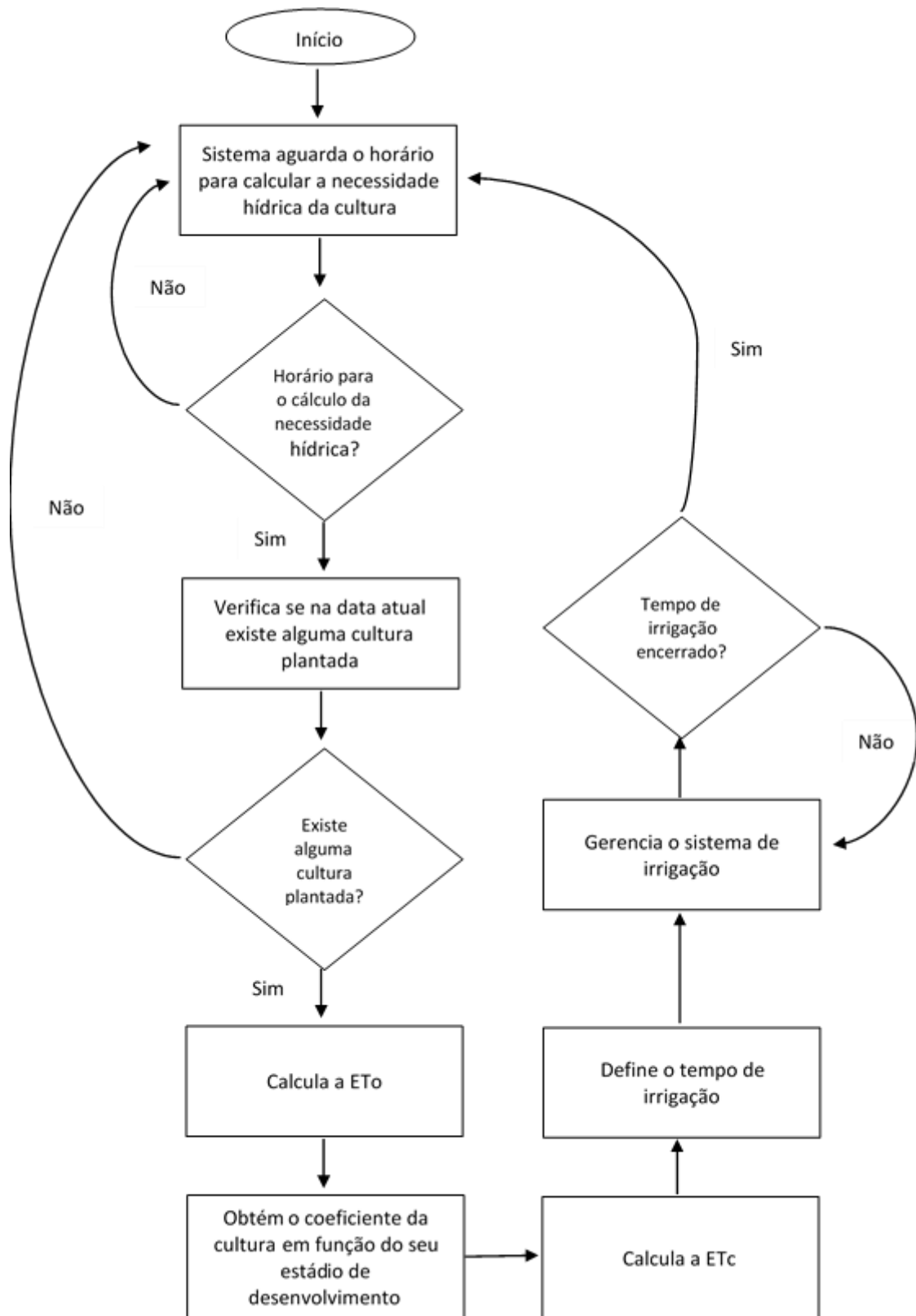
Z (m)	γ	Z (m)	γ	Z (m)	γ	Z (m)	γ
0	0,067	1000	0,060	2000	0,053	3000	0,047
100	0,067	1100	0,059	2100	0,052	3100	0,046
200	0,066	1200	0,058	2200	0,052	3200	0,046
300	0,065	1300	0,058	2300	0,051	3300	0,045
400	0,064	1400	0,057	2400	0,051	3400	0,045
500	0,064	1500	0,056	2500	0,050	3500	0,044
600	0,063	1600	0,056	2600	0,049	3600	0,043
700	0,062	1700	0,055	2700	0,049	3700	0,043
800	0,061	1800	0,054	2800	0,048	3800	0,042
900	0,061	1900	0,054	2900	0,047	3900	0,042

Fonte: FAO 56 (Allen *et al.*, 1998)

O sistema automático de irrigação, através do microcontrolador, lê os dados dos sensores, calcula a necessidade hídrica da cultura, subtrai o volume de chuva da região e em seguida gerencia o sistema de irrigação através de relés que acionam a bomba de irrigação da área irrigada. Foram utilizadas informações dos medidores de vazão, instalados na área do experimento, e do consumo em KW/h das bombas de irrigação, para mensurar os valores de consumo de água e energia elétrica.

Dessa forma, o sistema às nove horas do dia calcula a evapotranspiração de referência (ET_o) do dia anterior, pelo método de Penman-Monteith, utilizando as grandezas armazenadas no banco de dados do Raspberry. Em seguida, calcula a evapotranspiração da cultura (ET_c) utilizando informações do coeficiente da cultura (K_c) em função do seu estágio de desenvolvimento. Para que isso seja possível, na base de dados do sistema devem estar cadastrados os valores referentes aos coeficientes de diversas culturas em função do seu estágio de desenvolvimento. Assim, o sistema após o cálculo da ET_o, utilizando informações do tipo da cultura cultivada e data de início do cultivo, constata o estágio de desenvolvimento em que se encontra a planta e seu respectivo coeficiente de cultura para o cálculo da ET_c. A Figura 29 demonstra o fluxograma do sistema de irrigação.

Figura 29 – Fluxograma do sistema de irrigação



Fonte: Autor, 2018

O controle da irrigação foi realizado automaticamente através do controlador que enviava um sinal elétrico para o relé que ligava a bomba de irrigação. Enquanto o relé não

recebesse o sinal elétrico de desligamento, a irrigação era mantida permitindo a irrigação da área corresponde à parcela a ser irrigada.

O sistema de controle automático de irrigação foi desenvolvido para ser independente, ou seja, calcular a quantidade de água e o tempo de irrigação a partir das informações da evapotranspiração da cultura; e controlar através de relés o acionamento da bomba de recalque de água correspondente aos canteiros a serem irrigados

Todo o gerenciamento do sistema de irrigação se comportou como um sistema supervisor, podendo ser acessado de qualquer aparelho que permita uma conexão de rede sem fio (WIFI).

Contudo, todo o equipamento foi desenvolvido para ser facilmente reparado, caso ocorresse algum problema, devido ao uso inadequado, falhas de instalação ou intempéries. Para isso, basta que o componente seja substituído por um novo e aplicado a correta configuração, a um custo bem menor do que se o agricultor necessitasse adquirir novos sensores ou *data logger*.

3.2.3 Testes e aplicação do sistema de irrigação

Corresponde à segunda fase do projeto, onde essa etapa refere-se aos testes e aplicação do sistema no Campus Rural da Universidade Federal de Sergipe (UFS). O sistema foi avaliado nos aspectos funcionalidade, usabilidade, confiabilidade, eficiência e viabilidade. O sistema foi colocado em condições externas, propícias a intempéries e interações humanas, disposto a erros e mau uso. A escolha do Campus Rural da UFS se deu por possuir o mesmo sistema de irrigação do perímetro irrigado Porção da Ribeira e dispor de toda estrutura favorável a realização dos testes e aplicação do referido sistema.

3.2.3.1 Instalação e avaliação da coleta de dados meteorológicos

A estação meteorológica foi instalada no Campus Rural no dia 30 de novembro de 2017, Figura 30, com intuito de coletar os dados meteorológicos da região e gerenciar o sistema de irrigação.

Figura 30 - Estação meteorológica instalada no Campus Rural da UFS



Fonte: Autor, 2017

Uma vez que a radiação solar é o elemento climático de maior importância da taxa de evapotranspiração e corresponde a 80% da ETO (Chang, 1971), foi realizada a coleta dos dados meteorológicos, no período de 01 de dezembro de 2017 a 30 de dezembro de 2017, com o intuito de avaliar o Erro Padrão da Estimativa (EPE) e o Erro Padrão da Estimativa Ajustado (EPEA) para radiação solar.

Para que fosse possível realizar a referida avaliação foram utilizados como referência os valores da radiação solar da estação meteorológica automática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), município de Aracaju, uma vez que é a mais próxima do campus Rural.

Além da avaliação da radiação solar, no período em questão, foi realizada a avaliação da periodicidade dos valores de temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do vento e volume de chuva; e a comparação desses dados com os da estação meteorológica instalada no Campus Rural, Irriplus modelo E5000, com o intuito de averiguar se os valores encontrados estavam em conformidade com os valores da região.

Os valores foram lidos diariamente, minuto a minuto, de forma sincronizada e armazenados no banco de dados presente na estação meteorológica. A avaliação correspondeu aos valores para cada dia do mês de dezembro, de forma que para radiação solar foi obtido o

valor em MJ/m².dia, para temperatura, umidade relativa e velocidade do vento o valor médio diário, e para chuva o volume precipitado no dia.

3.2.3.2 Avaliação do Sistema de Irrigação com uma cultura hipotética

Essa fase correspondeu à avaliação da estação meteorológica e do sistema de irrigação em coletar os dados necessários para estimativa da evapotranspiração de uma cultura e definição do tempo de irrigação. Diante disso, uma vez os dados meteorológicos ajustados e em concordância com os da região, foi avaliada a funcionalidade da estação meteorológica em calcular a evapotranspiração de referência, a evapotranspiração de uma cultura hipotética, volume de água a ser aplicado, tempo de irrigação e o controle automático do sistema de irrigação.

Para isso foi escolhida a cultura da Alface, uma das hortaliças mais consumidas no mundo, que possui grande produtividade no Perímetro Irrigado Porção da Ribeira e necessita de alto consumo de água para ser cultivada. Para o cultivo da alface foram utilizados os valores do Coeficiente de Cultura (Kc) conforme tabela 4.

Tabela 4 - Coeficientes de cultura (Kc) para a alface conforme estágio de desenvolvimento da planta

Hortaliça	Estádio de desenvolvimento			
	Inicial 10 dias	Vegetativo 10 dias	Produção 10 dias	Final 10 dias
Alface	0,85	0,85 – 1,05	1,05	1,05 – 0,95

Fonte: Adaptado de Marouelli *et al.* (2010)

Para aplicação da lâmina d'água na cultura foi utilizado o sistema de irrigação por microaspersor. Por conta disso, foi necessário medir o volume de água aplicado por cada microaspersor no campo. Assim, realizou-se a medição da vazão e do raio de alcance dos microaspersores instalados na área do experimento, tendo como vazão média o valor de 96 litros/hora por microaspersor com raio de 3,5 metros de área molhada.

O experimento com a cultura hipotética, a alface, iniciou-se no dia 05 de fevereiro de 2018 e finalizou-se no dia 16 de março de 2018, totalizando 40 dias. Nessa fase não existiu a cultura plantada nos canteiros, apenas uma simulação para avaliar a funcionalidade da estação meteorológica em calcular a evapotranspiração da cultura e o gerenciamento automático do sistema de irrigação.

Durante toda a fase de testes foram realizados diversos ensaios com o sistema de acionamento e desligamento do motor de irrigação, mesmo não existindo a cultura plantada nos

canteiros, com o intuito de realizar todos os ajustes necessários antes da aplicação com uma cultura plantada nos canteiros.

Além disso, foi avaliada a coleta das variáveis meteorológicas necessárias para o cálculo da evapotranspiração, o cálculo da evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith, definição do coeficiente da cultura (K_c) em função do seu estágio de desenvolvimento, cálculo da evapotranspiração da cultura e a definição e gerenciamento do tempo de irrigação.

3.2.3.3 Avaliação do Sistema de Irrigação com a cultura do coentro

Uma vez realizados todos os testes e ajustes necessários na estação meteorológica junto ao sistema de irrigação, partiu-se para a avaliação do sistema com uma cultura plantada em canteiros do Campus Rural.

Essa fase teve como proposta a avaliação da estação meteorológica e do sistema automático de irrigação, no tocante ao uso correto da água para irrigação e sua possível contribuição no incremento da produtividade da região.

Antes do início do experimento foram retiradas amostras do solo na profundidade de 0 a 20 cm, as quais foram analisadas no Laboratório de Remediação do Solo da UFS, cujos resultados estão presentes na tabela 5.

Tabela 5 - Resultado da amostra do solo do campus Rural

pH	Ca ²⁺ +Mg ²⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ³⁺	H+Al	P	K ⁺	Na ⁺	M.O.
H ₂ O	----- cmol _c dm ⁻³ -----			-----				----- mg dm ⁻³ -----			%
6,22	3,02	1,84	1,18	0,08	0,06	0	0,127	39,33	32,60	13,8	1,03
Soma de bases		CTC efetiva		CTC potencial		Saturação por bases (V)		Saturação por Al ³⁺		PST	
----- cmol _c dm ⁻³ -----			-----			----- % -----			-----		
3.16		3.16		3.28		96.34		0		1.82	

Fonte: Autor, 2018.

O preparo do solo consistiu da limpeza e retirada do material para fora da área experimental, seguida de uma gradagem e levantamento dos canteiros com a ajuda de um trator. Foram levantados 5 canteiros com 20 m de comprimento, 1,2 m de largura, 0,30 m de altura. Durante o levantamento dos canteiros foi realizada a adubação de fundação com adubo orgânico, esterco bovino curtido, sendo 3 kg/m² de esterco por canteiro. A Figura 31 apresenta o processo de aplicação da grade aradora, incorporação do esterco bovino e levantamento dos canteiros.

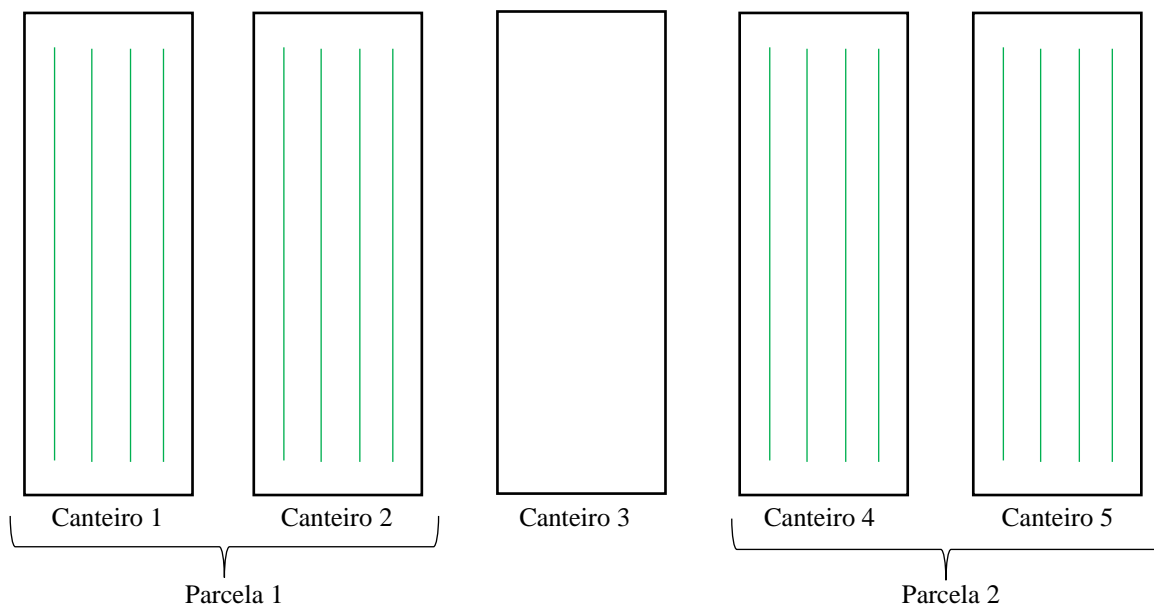
Figura 31 - Aplicação da grade aradora, incorporação do esterco bovino e levantamento dos canteiros.



Fonte: Autor, 2018

O experimento foi dividido em duas parcelas, sendo duas repetições por parcela, onde a primeira parcela utilizou os dois primeiros canteiros, e a segunda parcela os dois últimos canteiros. O canteiro do meio não foi utilizado durante o experimento devido a irrigação dos microaspersores instalados nas parcelas das extremidades aplicarem lâmina d'água no canteiro central, comprometendo os resultados do experimento. A figura 32 representa as parcelas com seus respectivos canteiros.

Figura 32 - Representação das parcelas do experimento



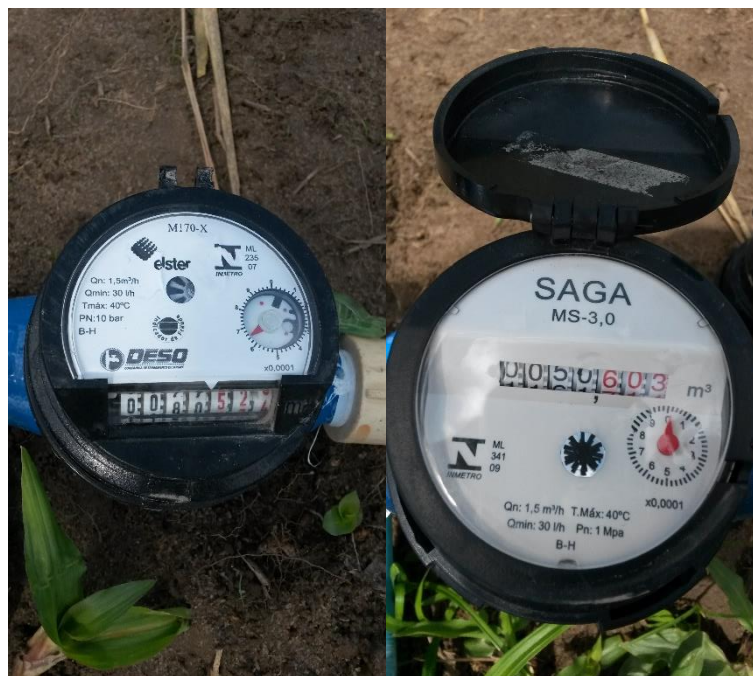
Fonte: Autor, 2018

Dois dias anteriores ao plantio foi realizada a adubação química com 1,440 kg de superfosfato simples, 160 g de ureia e 250 g de cloreto de potássio por canteiro. O cultivo foi estabelecido em fileiras, figura 32, sendo 4 fileiras de 20 m por canteiro, com espaçamento de 0,20 m, totalizando 160 m por parcela.

A cultura utilizada foi o coentro (*Coriandrum sativum* L.), hortalícia de ciclo vegetativo curto, variando o seu tempo de colheita em função da sua variedade e época do plantio. A escolha do coentro ocorreu por ser uma hortalícia bastante cultivada na Região Nordeste do Brasil, com grande produtividade no Perímetro Irrigado Porção da Ribeira. O coentro semeado foi do tipo verdão aplicando 25g de sementes por linha de canteiro.

Para cada parcela do experimento foi instalado um sistema de irrigação, ambos utilizando microaspersores, de forma que eles pudessem ser independentes nos aspectos: volume de água a ser aplicado, horário e tempo da irrigação. Com o intuito de realizar o acompanhamento do volume de água aplicado em cada parcela foram inseridos dois hidrômetros, Figura 33, na área do experimento, possibilitando a comparação do volume de água aplicado e a produção da cultura.

Figura 33 - Hidrômetros instalados para medição do volume de água aplicada por cada parcela do experimento.



Fonte: Autor, 2018

A cultura foi semeada manualmente, Figura 34, em fileiras, no dia 07 de março de 2018 e durante os 16 primeiros dias após o plantio as plantas foram irrigadas de forma semelhante com o intuito de assegurar uma boa germinação e estabelecimento da cultura. Somente a partir

do dia 23 de março, Figura 35, iniciou-se a irrigação diferenciada. Desta forma, a Parcela 1 foi administrada de forma convencional pelos funcionários do Campus Rural e a Parcela 2 foi controlada pelo Sistema Automático de Irrigação presente na estação meteorológica.

Figura 34 - Coentro semeado nos canteiros no dia 07 de março de 2018.



Fonte: Autor, 2018

Figura 35 - Coentro com 16 dias de semeadura, início da diferenciação da irrigação.



Fonte: Autor, 2018

Na Parcela 1, os funcionários do Campus Rural da UFS decidiam de forma empírica quando e quanto de água aplicar na cultura, não sofrendo nenhuma influência na tomada de decisões. Já a Parcela 2 a estação meteorológica calculava a evapotranspiração de referência, tendo como base os dados meteorológicos do dia anterior, definia o K_c da cultura em função

do seu estágio de desenvolvimento, calculava a evapotranspiração da cultura, subtraía o volume de chuva da região e calculava o tempo de irrigação. Caso houvesse necessidade de irrigar a cultura, o sistema enviava um sinal para o relé de controle do acionamento da bomba de irrigação, acionando o sistema.

Nos canteiros gerenciados pelo sistema de irrigação, parcela 2, o sistema foi programado para irrigar a cultura duas vezes ao dia, sendo a primeira pela manhã com início às 09 h e a segunda à tarde às 14 h.

Os valores para o coeficiente da cultura (K_c) do coentro utilizados no experimento foram baseados no trabalho de Silva *et al.* (2013), que definiu os valores para o coeficiente da cultura do coentro no município de Itabaiana-SE. Os valores utilizados estão presentes na tabela 6.

Tabela 6 - Valores do Coeficiente da Cultura (K_c) para cada estágio do desenvolvimento do coentro.

Estádios	K_c
Inicial	0,85
Vegetativo	0,85 - 1,05
Produção	1,05
Final	1,05 - 0,95

Fonte: Silva *et al.* (2013)

Cada parcela experimental possuía 6 aspersores para aplicação da lamina d'água, atendendo os dois canteiros da parcela. O monitoramento do experimento foi feito diariamente, realizando o controle manual de ervas daninhas e a limpeza dos microaspersores.

Durante o experimento foram realizadas duas adubações de cobertura, sendo a primeira com 20 dias após o plantio e a segunda com 34 dias. Cada aplicação correspondeu a 156 g de ureia e 60 g de potássio por canteiro. Todas as adubações foram realizadas com base na análise do solo, tabela 5.

A colheita do coentro foi feita no dia 13 de abril, Figuras 36 e 37, estando o coentro com 38 dias de plantado, antes do início do pendoamento da cultura, quando foram realizadas avaliações da massa fresca e da massa seca do cultivo. Sendo a massa seca obtida após secagem em estufa por 72 horas a 65° C, para posterior pesagem. Todas as pesagens foram realizadas no laboratório de Remediação dos Solos da Universidade Federal de Sergipe, onde os dados foram submetidos a análise de variância, com o teste de Tukey ao nível de 5% de significância, com o auxílio do software SISVAR.

Figura 36 - Coentro no dia da colheita



Fonte: Autor, 2008

Para as avaliações, massa fresca e seca, retirou-se as duas fileiras da extremidade (bordadura) de cada canteiro, colhendo a cultura presente nos 4 metros centrais das duas fileiras restantes. Os tubos em azul, Figura 36, demonstram a marcação realizada no dia da colheita da área a ser analisada.

Figura 37 - Colheita do coentro



Fonte: Autor, 2018

A colheita ocorreu com a ajuda de dois funcionários do Campus Rural, Figura 37, de forma que todo coentro colhido foi lavado, com a ajuda de baldes com água, para retirada do solo presente em suas raízes, com o intuito da pesagem não conter nenhum elemento que não fosse a cultura. A Figura 38 representa o estado dos canteiros após a colheita da amostra a ser analisada.

Figura 38 - Canteiros após a colheita para avaliações de massa fresca e seca



Fonte: Autor, 2018

Todo o material coletado foi levado para o laboratório de Remediação dos Solos da Universidade Federal de Sergipe, Campus São Cristóvão, e realizada a pesagem da massa fresca e seca. Toda a amostra foi identificada através de siglas que especificavam a parcela, o canteiro e a linha que foi coletada. A tabela 7 demonstra a identificação utilizada durante a pesagem do coentro (Figuras 39 e 40).

Tabela 7 - Identificação das parcelas, canteiros e linhas de coentro utilizados na amostra

SIGLA	Parcela	Canteiro	Linha
C1L1	Parcela 1	Canteiro 1	Linha 2
C2L1	Parcela 1	Canteiro 1	Linha 3
C3L2	Parcela 1	Canteiro 2	Linha 2
C4L2	Parcela 1	Canteiro 2	Linha 3
M1L3	Parcela 2	Canteiro 1	Linha 2
M2L3	Parcela 2	Canteiro 1	Linha 3
M3L4	Parcela 2	Canteiro 2	Linha 2
M4L4	Parcela 2	Canteiro 2	Linha 3

Fonte: Autor (2018)

Figura 39 – Pesagem da massa fresca do coentro



Fonte: Autor, 2018

Figura 40 - Secagem do coentro em estufa e pesagem da massa seca



Fonte: Autor, 2018

3.2.4 Conscientização dos agricultores do perímetro irrigado Porção da Ribeira quanto a importância da realização do manejo de irrigação.

Uma vez passado o período de testes o sistema proposto foi colocado à disposição para ser utilizado como uma tecnologia social a favor de uma comunidade local. O local escolhido foi o perímetro irrigado Porção da Ribeira, por estar entre os perímetros mais significativos no tocante ao volume de produção e comercialização de hortaliças no estado de Sergipe.

Com o auxílio da COHIDRO, empresa estatal responsável pela administração do perímetro, foi marcada a atividade educativa junto aos agricultores da região com o intuito de capacitar essa comunidade. Desta forma foi abordada, através de palestra, a importância da realização do manejo de irrigação.

A atividade ocorreu no dia 23 de agosto de 2018, na sede da COHIDRO localizada no perímetro irrigado Porção da Ribeira e contou com a participação de irrigantes de todos os 7 setores do perímetro e funcionários da COHIDRO e ENDAGRO.

Os agricultores tiveram a oportunidade de tirar dúvidas, compreender o funcionamento do sistema proposto, realizar simulações, acessar o sistema para consultas dos dados meteorológicos, tempo de irrigação e evapotranspiração da cultura.

Para mensurar o interesse em utilizar a tecnologia desenvolvida e conhecer os tipos de culturas cultivadas pelos agricultores da região, foi aplicado um questionário contendo perguntas objetivas. A escolha por perguntas objetivas se deu em função do nível de escolaridade do público presente e por acreditar que esse tipo de pergunta facilitaria a aplicação do questionário.

4 ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

4.1 Calibração da Estação Meteorológica

Através dos resultados obtidos com as medições realizadas pela estação meteorológica de referência, Irriplus E5000 e com a estação desenvolvida foram traçados gráficos de regressão para gerar as equações de calibração. Foi empregado o coeficiente de correlação de Pearson (r) para quantificar a direção e intensidade da relação entre as variáveis em um diagrama de dispersão; o índice de concordância de Willmott (d) para indicar a precisão dos valores preditos em relação aos valores observados; o índice de desempenho (c) para medir a confiança ou desempenho do método ou modelo utilizado; e o coeficiente de determinação (R^2) para constatar o quanto o modelo consegue explicar os valores observados.

O coeficiente de correlação de Person pode assumir valores entre -1 e 1 e serve para quantificar o grau de relacionamento linear entre duas variáveis. Valores próximos a 1 ou -1 indicam uma alta correlação positiva ou negativa, ou seja, que as variáveis são diretamente ou inversamente proporcionais.

O índice de concordância (d) pode assumir valores entre 0 e 1, sendo que o valor igual a 1 indica uma ótima concordância entre os dados observados e estimados, enquanto que o valor 0, significa nenhuma concordância entre os valores analisados.

O índice de desempenho (c), criado por Camargo e Sentelhas (1997), estabelece critérios para interpretação do desempenho dos métodos, conforme tabela 8.

Tabela 8 - Valores do índice de desempenho para critérios de avaliação do desempenho do modelo

Valores de c	Desempenho
$> 0,85$	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito Bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Mau
$< 0,40$	Péssimo

Fonte: Camargo e Sentelhas (1997)

O coeficiente de determinação ou R-quadrado (R^2) indica o grau de ajuste linear entre duas variáveis ou grau de dependência entre elas. A correlação linear pode ser expressa através de um gráfico de dispersão. Quanto mais alinhados estiverem os pontos à reta, maior deve ser a correlação linear entre as duas variáveis.

O nível de 5% de significância estatística foi estabelecido antes da realização do

experimento e corresponde ao risco que se corre de rejeitar uma hipótese. A significância de um resultado é denominada de *p-value*. Quando *p-value* é menor ou igual a 5×10^{-2} , dizemos que a correlação é significativa diferente de zero com 95% de confiança.

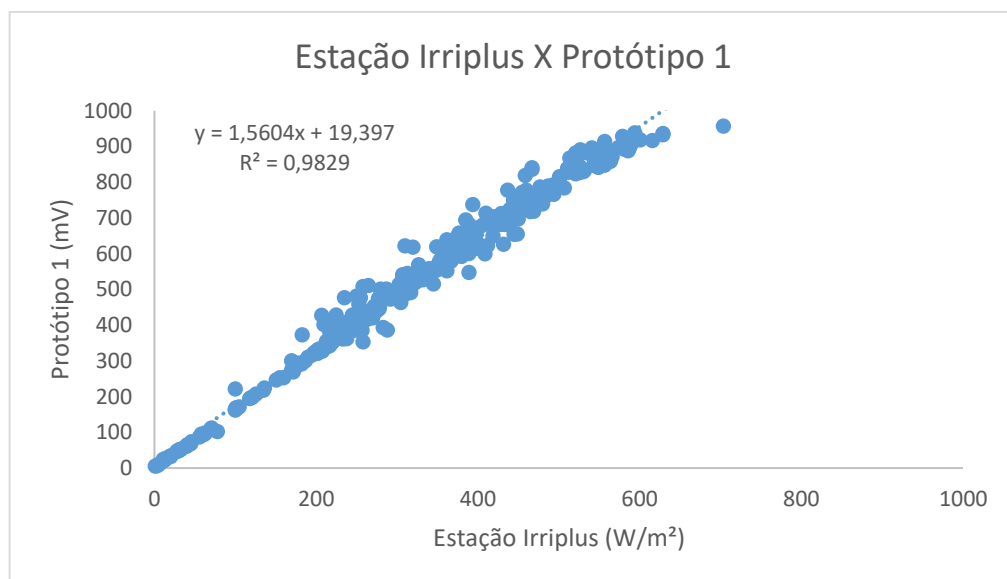
Os gráficos foram gerados através da planilha eletrônica Excel e as variáveis estatísticas foram calculadas com o auxílio do software estatístico R versão 3.4.2.

4.1.1 Piranômetro

Para radiação solar foram desenvolvidos dois corpos de instrumentos com o intuito de averiguar qual deles teria uma melhor resposta ao espectro luminoso quando comparado ao equipamento padrão.

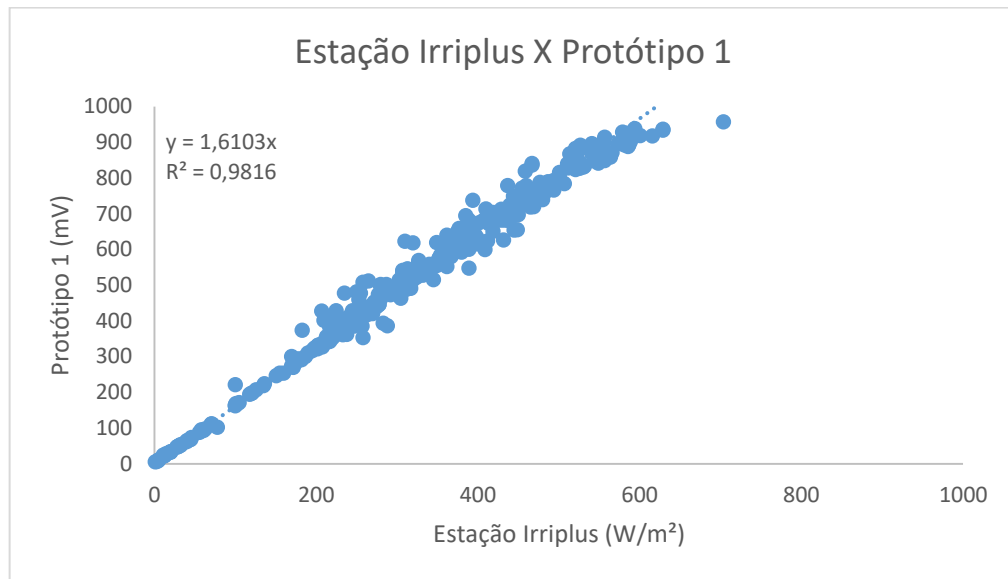
O primeiro corpo de instrumento desenvolvido, utilizando camuflador de câmera de segurança (Figura 18), está representado nos gráficos como protótipo 1, e o segundo corpo, utilizando uma luva para eletrodutos de rede elétrica (Figura 19), como protótipo 2. Na primeira fase de calibração foram anotados 374 registros de radiação solar por sensor, diversificando dias e horários, no período de 06 a 14 de fevereiro de 2017. As Figuras 41 a 44 representam os valores de dispersão dos dados da radiação solar para cada corpo de protótipo desenvolvido.

Figura 41 - Diagrama de dispersão da Radiação Solar Sensor Padrão e Protótipo 1 – Fase 1



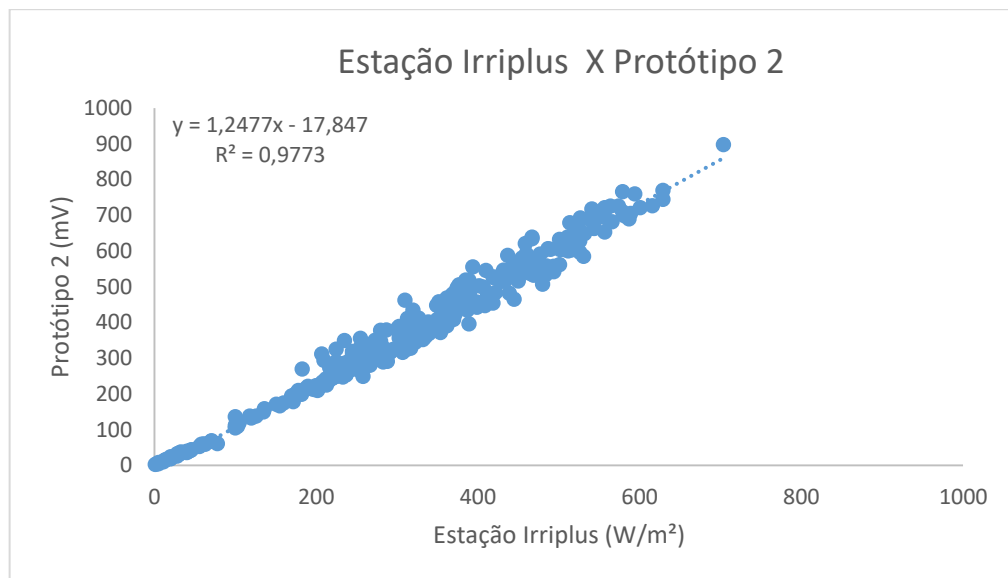
Fonte: Autor, 2017

Figura 42 - Diagrama de dispersão da Radiação Solar Sensor Padrão e Protótipo 1 sem o intercepto – Fase 1



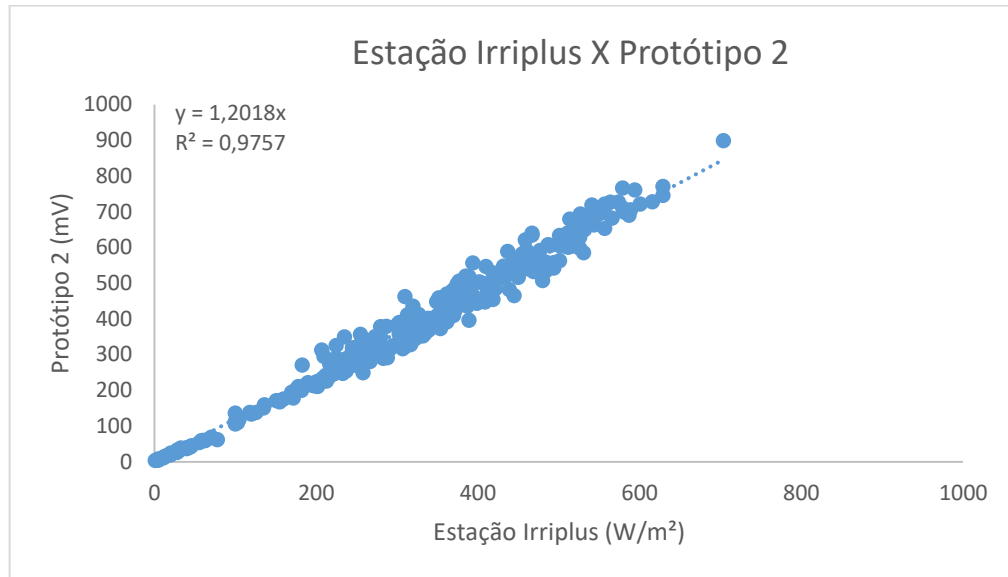
Fonte: Autor, 2017

Figura 43 - Diagrama de dispersão da Radiação Solar Sensor Padrão e Protótipo 2 – Fase 1



Fonte: Autor, 2017

Figura 44 - Diagrama de dispersão da Radiação Solar Sensor Padrão e Protótipo 2 sem o intercepto – Fase 1



Fonte: Autor, 2017

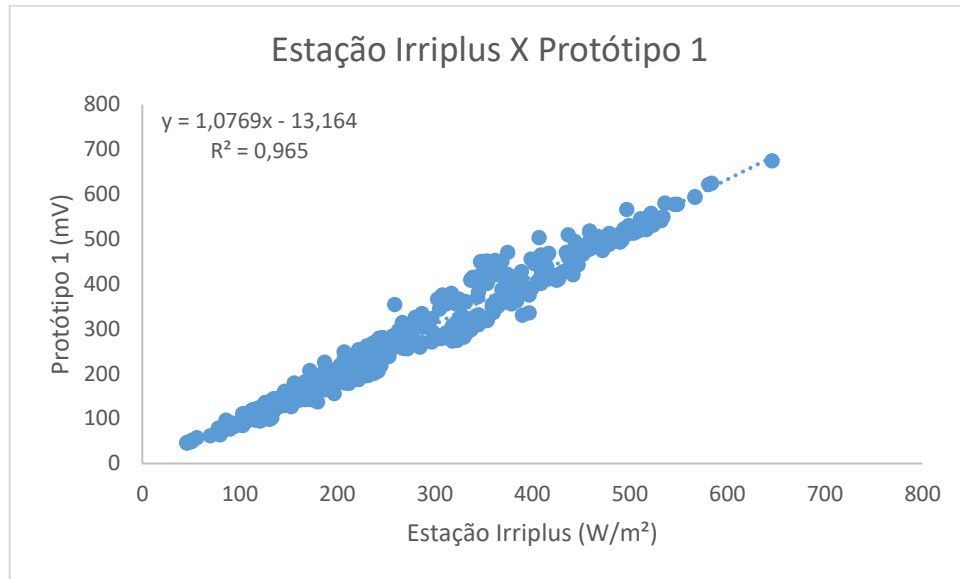
As Figuras 41 a 44 apresentam a análise da regressão linear entre os valores estimados da radiação, bem como os coeficientes de determinação (R^2) para as regressões forçadas pela origem, Figuras 42 e 44, e regressão completa, Figuras 41 e 43.

Através das equações de calibração geradas pelas regressões das Figuras 41 a 44, observa-se que os protótipos apresentaram um bom ajuste em relação ao sensor padrão, com o coeficiente de determinação (R^2) de 0,98 para o protótipo 1 e 0,97 para o protótipo 2. O valor do coeficiente de determinação (R^2) representa o quanto da variação da tensão em mV pode ser explicada pela irradiância medida pelo piranômetro padrão (Wm^{-2}). Isso significa que o coeficiente de determinação explica 98% e 97% dos dados observados.

Apesar dos bons valores encontrados para o coeficiente de determinação, observa-se, através das Figuras 42 e 44, que os sensores desenvolvidos superestimaram os valores em 61% para o protótipo 1 e 20% para o protótipo 2. Para um melhor ajuste do coeficiente angular, próximo de 1, foram substituídos os resistores do circuito, Figura 20, com a expectativa de obter um resultado mais satisfatório.

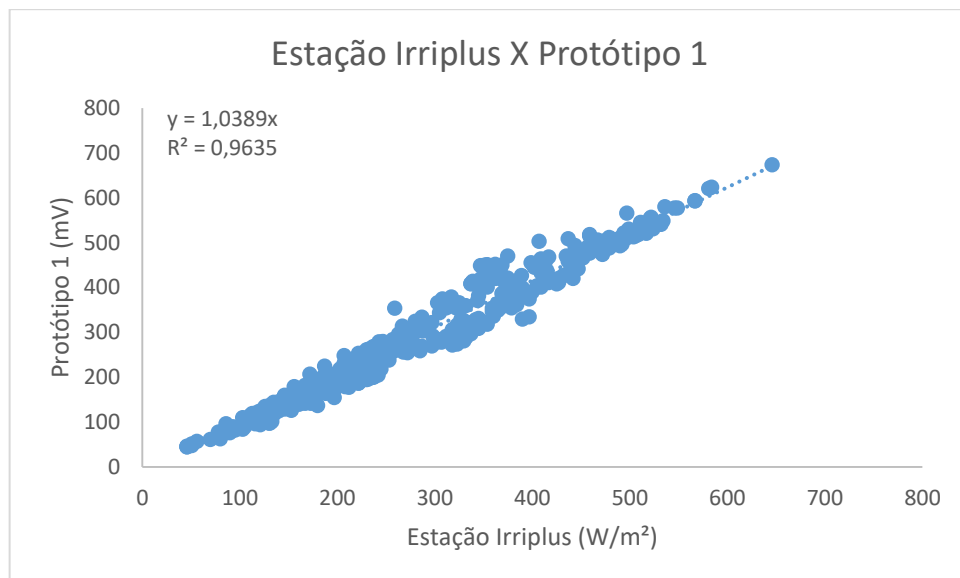
Repetiu-se o procedimento de leitura da radiação utilizando os três equipamentos, segunda fase, nos períodos de 03 a 10 de março e 5 a 6 de abril de 2017. Foram obtidos 487 registros por sensor, utilizando a mesma metodologia da fase 1.

Figura 45 - Diagrama de dispersão da Radiação Solar Sensor Padrão e Protótipo 1 – Fase 2



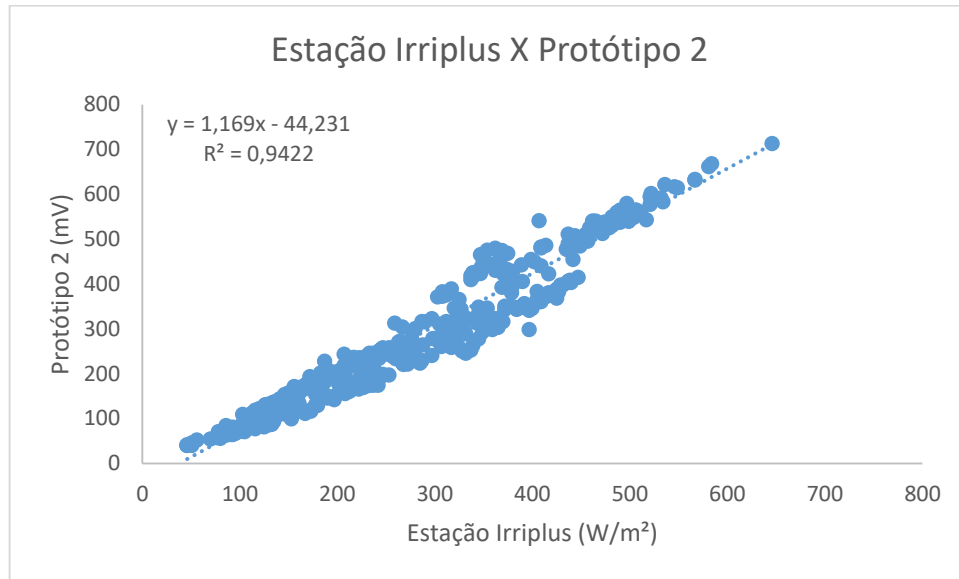
Fonte: Autor, 2017

Figura 46 - Diagrama de dispersão da Radiação Solar Sensor Padrão e Protótipo 1 sem o intercepto – Fase 2



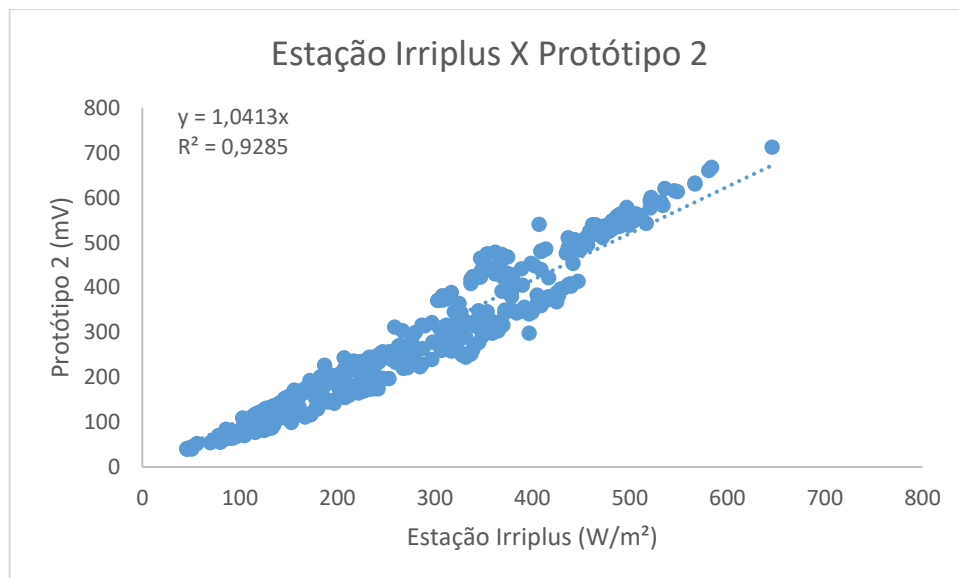
Fonte: Autor, 2017

Figura 47 - Diagrama de dispersão da Radiação Solar Sensor Padrão e Protótipo 2 – Fase 2



Fonte: Autor, 2017

Figura 48 - Diagrama de dispersão da Radiação Solar Sensor Padrão e Protótipo 2 sem o intercepto – Fase 2



Fonte: Autor, 2017

A segunda fase obteve um melhor ajuste do coeficiente angular, bem mais próximo de 1 e um bom coeficiente de determinação (R^2), conforme pode ser observado nas Figuras 45 a 48.

Os protótipos apresentaram coeficientes de determinação de 0,96 para o protótipo 1 e 0,94 para o protótipo 2, considerados bons, uma vez que explica 96% e 94% dos dados observados e o restante dessa variação é devido a outros fatores e é chamado de erro experimental. O *p-value* encontrado foi de 2×10^{-6} para ambos os casos enfatizando que o

coeficiente angular da reta é significativo.

Na segunda fase verificou-se que os valores de Radiação Solar medidos pelos sensores desenvolvidos ficaram muito próximos do sensor de referência, superestimando os valores em 3% para o protótipo 1, Figura 46, e em 4% para o protótipo 2, Figura 48.

O protótipo 1, quanto ao diagrama de dispersão, Figuras 45 e 46, apresentou os pontos mais distribuídos em torno da reta, mostrando que existe uma melhor relação linear entre as variáveis envolvidas comparado ao protótipo 2, Figuras 47 e 48. Na tabela 9 encontram-se os valores da comparação estatística dos dois corpos de instrumentos desenvolvidos nas duas fases de calibração.

Tabela 9 – Comparação estatística dos dois corpos de instrumentos desenvolvidos

Fases	Protótipo 1		Protótipo 2	
	R ²	Superestimava do valor	R ²	Superestimava do valor
Fase 1	0,98	61%	0,97	20%
Fase 2	0,96	3%	0,94	4%

Fonte: Autor, 2017.

Valores semelhantes foram encontrados por Finholdt *et al.* (2011), que desenvolveu um piranômetro utilizando o fotodiodo BPW20R, encontrando um coeficiente de determinação (R²) igual a 0,99. Esses valores não se diferenciaram dos encontrados por Neves (2013), que ao utilizar o fotodiodo BPW35S também encontrou um R² igual a 0,99. Já Sugawara (2003), ao usar o transistor 2N3055 obteve R² igual a 0,99 para o intervalo de 0 a 265 W.m⁻² e 0,91 para o intervalo de 265 a 1300 W.m⁻².

Além dos valores de coeficiente de determinação, inclinação da reta, intercepto e *p-value*, encontramos o coeficiente de correlação de Pearson (r), o índice de concordância (d) e o índice de desempenho (c). Os valores do coeficiente de correlação entre Estação Irriplus-Protótipo 1 e Estação Irriplus-Protótipo 2, apresentam r igual a 0,98 e 0,97 respectivamente para ambos protótipos. Isso indica um alto grau de correlação positiva entre os dados.

O índice de concordância encontrado foi de 0,99 para o protótipo 1 e 0,98 para o protótipo 2; e o índice de desempenho 0,97 e 0,95 respectivamente, considerados ótimos conforme tabela 8 de Camargo e Sentelhas (1997).

Como pode ser observado, o ajuste realizado nos resistores do circuito teve um efeito significativo, tornando os valores da segunda fase melhores que o da anterior. Com isso foi escolhida a configuração da Fase 2 para ser utilizada na estação desenvolvida com o protótipo 1, uma vez que foi o protótipo 1 que apresentou os pontos mais agrupados em torno da reta e

melhores resultados para o coeficiente determinação, inclinação da reta, coeficiente de correlação, índices de concordância e desempenho.

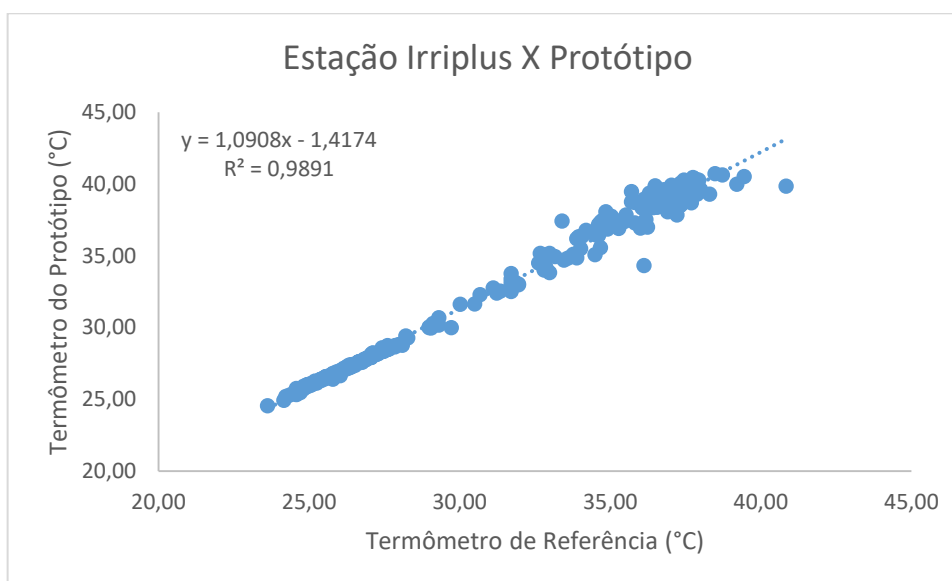
Dessa forma, foi possível afirmar que o elemento sensível escolhido, fotodiodo BPW34, juntamente com o corpo de instrumento desenvolvido, protótipo 1, apresentou valores confiáveis na coleta de dados, visto a similaridade entre as séries de dados, onde os erros encontrados podem ser considerados insignificantes visto a diferença existente entre os instrumentos de medição e a ótima dispersão encontrada em todas as análises realizadas.

4.1.2 Termômetro e Higrômetro

Para medição da temperatura e umidade relativa do ar foi utilizado um termo-higrômetro da Sensirion, modelo SHT21. O SHT21 é um sensor pré-calibrado pelo fabricante com faixa de operação para temperatura de -40°C a 125°C e umidade relativa de 0 a 100%. Como sensor padrão foi utilizado o termômetro e higrômetro da estação meteorológica Irriplus, modelo E5000.

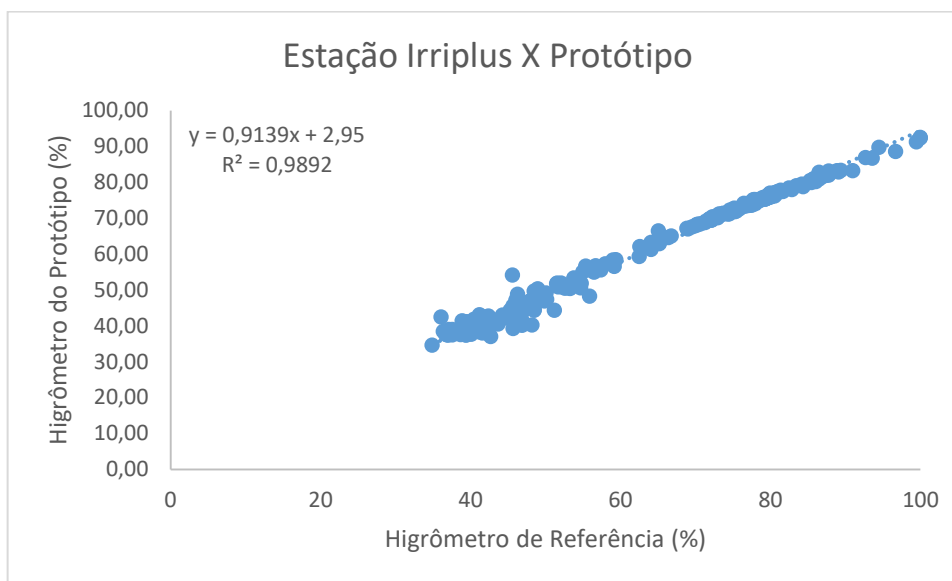
A coleta dos dados foi realizada diariamente, minuto a minuto, no período de 09 a 20 de fevereiro de 2017. As Figuras 49 e 50 representam os valores de dispersão dos dados de temperatura e umidade relativa do ar respectivamente.

Figura 49 - Diagrama de dispersão da Temperatura Sensor Padrão e Protótipo



Fonte: Autor, 2017

Figura 50 - Diagrama de dispersão da Umidade Relativa do Sensor Padrão e Protótipo



Fonte: Autor, 2017

Através das equações de calibração geradas pelas regressões das Figuras 49 e 50, observou-se uma ótima correlação entre os dados de temperatura e umidade relativa do ar do sensor padrão e os valores do protótipo, com coeficiente linear próximo de zero, coeficiente angular próximo de 1 e coeficiente de determinação (R^2) de 0,989 para ambos os sensores, explicando praticamente 99% dos dados observados. A significância desses valores foi comprovada indicando que existe uma forte correlação entre os pares de valores obtidos, com *p-value* de 2×10^{-6} para temperatura e umidade relativa.

É possível perceber que as séries representadas nas Figuras 49 e 50 estão em conformidade, porém o sensor de temperatura superestimou os valores em 9% e o de umidade relativa subestimou em 9%. Essa diferença pode ser considerada pouco significativa uma vez que o protótipo possui acurácia de $\pm 2\%$ para umidade relativa e $\pm 0,3^\circ$ Celsius para temperatura. Já o sensor de referência possui acurácia de $\pm 3,5\%$ para umidade relativa e $\pm 0,5^\circ$ Celsius para temperatura. Dessa forma a pequena diferença existente entre os valores medidos através dos sensores de referência e os protótipos pode ser explicada pelas dissemelhanças dos equipamentos, como também pelas dissemelhanças dos abrigos meteorológicos.

Em estudos realizados por Neves *et al.* (2015), utilizando o termo-higrômetro SHT75 foi encontrado o coeficiente de determinação (R^2) de 0,99 para temperatura e umidade relativa. Não diferenciando, Amorim *et al.* (2015) em Juazeiro-BA, empregou o LM35DZ para temperatura e o sensor HIH-4030-4031 para umidade relativa, obteve também 0,99 de coeficiente de determinação para ambas as grandezas. Finholdt *et al.* (2011), em Viçosa-MG

utilizou os mesmos sensores e alcançou R^2 idênticos.

Resultados semelhantes foram alcançados por Sugawara (2003), que usou um termistor NTC de 10K para temperatura e o HIH-3610 para umidade relativa e obteve, do mesmo modo, um R^2 de 0,99 para as duas grandezas. Já Palmieri *et al.* (2014), utilizou também sensores da série HIH-4000 para umidade relativa e o LM35DZ para temperatura, encontrou também bons resultados, mas com uma pequena diferença, $R^2 \approx 0,90$ para temperatura e $R^2 \approx 0,92$ para umidade relativa. Como pode ser observado, todos os valores encontrados pelos autores são bastante semelhantes aos encontrados neste trabalho.

Além do bom resultado do coeficiente de determinação (R^2) foi obtido um alto coeficiente de correlação para ambas grandezas, $r=0,99$, o que evidencia um alto grau de semelhança entre os dados. Os valores para o índice de concordância foi de 0,97 para temperatura e 0,98 para a umidade relativa do ar, indicando uma ótima concordância entre os valores observados e estimados. Pelo índice de desempenho (c) foram classificados como ótimos, com valores para temperatura de 0,97 e 0,98 para umidade relativa do ar. Na tabela 10 encontram-se os valores da comparação estatística dos dois sensores.

Tabela 10 – Valores estatísticos da temperatura e umidade relativa

Grandezas	Coeficiente de determinação R^2	Coeficiente de correlação r	Índice de concordância d	Índice de desempenho c
Temperatura	0,9891	0,99	0,97	0,97
Umidade Relativa	0,9892	0,99	0,98	0,98

Fonte: Autor, 2017.

Com isso, pode-se afirmar que o sensor escolhido, SHT21, juntamente com o abrigo meteorológico confeccionado, apresenta grande similaridade com os dados dos sensores padrão, demonstrando a viabilidade e confiabilidade do sensor com a calibração sugerida.

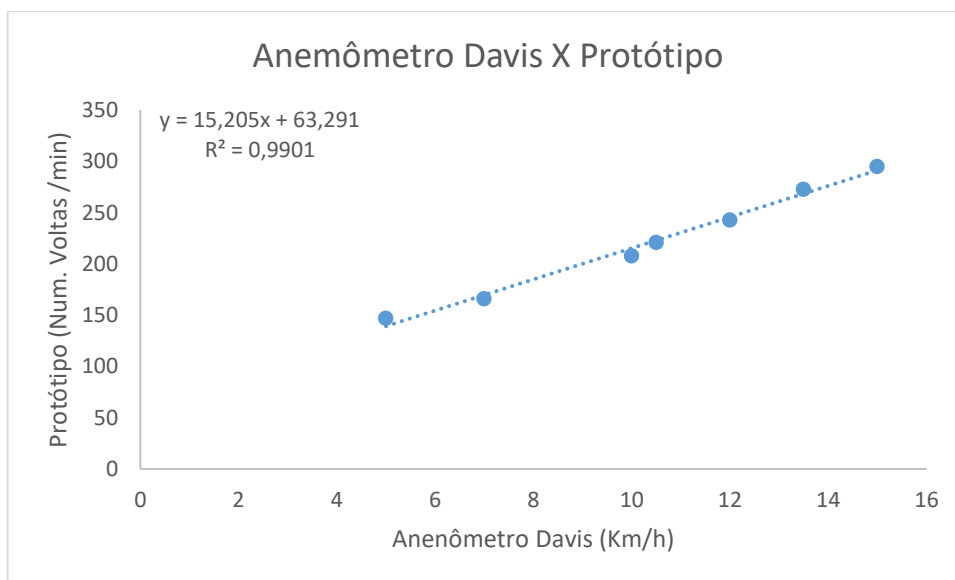
4.1.3 Anemômetro

O anemômetro desenvolvido tem como princípio de medição a contagem do número de voltas em um intervalo de tempo. A calibração consistiu em submeter o protótipo e o anemômetro padrão a um escoamento de ar, controlado por regulador de fluxo, obtendo velocidades de 5 a 15 Km/h. Verificou-se a quantidade de voltas para diferentes velocidades em períodos de 60 segundos para cada velocidade ensaiada.

Para fins de análise estatística, criou-se o diagrama de dispersão para as variáveis do

vento. Com isso obteve-se a equação que relaciona o número de voltas do protótipo com a velocidade do anemômetro de referência. A Figura 51 representa o diagrama de dispersão da velocidade do vento, sensor padrão e o número de voltas do anemômetro desenvolvido.

Figura 51 - Diagrama de dispersão da Velocidade do Vento Sensor Padrão e Protótipo



Fonte: Autor, 2017

Através do diagrama de dispersão, Figura 51, verifica-se a alta correlação entre a velocidade do vento medida pelo anemômetro padrão e o número de voltas do anemômetro desenvolvido. Constata-se o quanto os pontos estão agrupados em torno da reta, enfatizando a ótima relação entre as variáveis envolvidas.

O coeficiente de determinação (R^2) de 0,99 demonstra a grande similaridade existente entre os dados coletados. O valor desse coeficiente representa o quanto da variação do número de voltas por minuto do protótipo pode ser explicada pela velocidade do vento do anemômetro padrão (Km/h). Isso significa que R^2 explica 99% da variação dos dados observados.

Esse valor não se diferenciou estatisticamente dos obtidos por Cardoso *et al.* (2009), que desenvolveu e avaliou dois anemômetros, encontrando um R^2 de 0,96 para o de quatro conchas e R^2 igual a 0,95 para o de três conchas. Valores semelhantes foram encontrados por Finholdt *et al.* (2011), que encontrou um R^2 de 0,99 para o anemômetro construído. Já Sampaio *et al.* (2005), na construção de anemômetros de baixo custo, encontrou R^2 variando de 0,60 a 0,82, considerados satisfatórios uma vez que não apresentaram diferenças estatísticas ao nível de 5% de significâncias nos intervalos medidos.

Além do ótimo resultado do coeficiente de determinação (R^2), o alto valor do coeficiente de correlação, $r=0,99$, evidencia um alto grau de semelhança entre os dados. A significância

dos valores foi comprovada, com *p-value* de 0,0000033, indicando que existe uma forte correlação entre os pares de valores obtidos. Com isso, pode-se observar que as velocidades fornecidas pelo anemômetro padrão e o número de voltas do protótipo ficaram próximas, não apresentando diferenças estatísticas ao nível de 5% de significância nos intervalos medidos.

Os valores para os índices de concordância e de desempenho foram de 0,03 considerados ruins, o que já era esperado uma vez que para os fenômenos físicos vento, precipitação e vazão a distribuição Normal não é a mais indicada e sim a distribuição de Weibull.

Como pode ser observado, o anemômetro (protótipo) não apresentou diferenças estatística em relação a velocidade obtida pelo anemômetro padrão no intervalo de 5 a 15 Km/h. Dessa forma, uma variação na velocidade do vento no anemômetro padrão relaciona-se linearmente aos valores do número de voltas do protótipo.

A ótima dispersão encontrada confirma a confiabilidade do anemômetro desenvolvido, demonstrando a boa relação existente entre o número de voltas do protótipo e a velocidade do sensor padrão, assegurando o uso da equação de calibração sugerida.

4.1.4 Pluviógrafo

O pluviógrafo desenvolvido é do tipo basculante, formado por uma caçamba dividida em dois compartimentos. A quantidade de água necessária para registrar um tombamento da balança é de 7,08 ml que corresponde a um volume de 0,25 mm de chuva.

O equipamento foi submetido a um teste de precipitação, realizado através da simulação de uma precipitação, com intensidades diferentes, de forma a verificar a precisão do conjunto e a propagação do erro por balança.

Foram realizados 15 ensaios com fluxos de água diferentes para constatar o desempenho do equipamento. O tempo decorrido da operação de despejo de água sobre o sistema basculante ficou no intervalo de 5 a 19 minutos. Nos ensaios o volume de água aplicado foi de 283,2 ml que corresponde a 10 mm de chuva. Todos os ensaios foram repetidos duas vezes para garantir a confiabilidade da medição.

A precipitação registrada para o tempo de chuva igual ou superior a 19 minutos foi de 9,75 mm e tempos inferiores foi de 9,5 mm, com um erro de máximo de 5% para volumes de chuvas que correspondam a 120 mm/h. E A partir de 30 mm/h o erro diminui para 2,5 %.

Através dos testes foi observado que existe uma diferença entre o valor real e o

registrado, mas com pouca variação entre as medições. Foi constatado que quanto maior for a quantidade de chuva maior será o erro de medição. O aumento do erro se deu em função de que com o aumento do volume da precipitação, várias gotas acabaram se perdendo na transição das básculas, no momento do tombamento, de forma que uma quantidade de água flua na báscula que já encheu e estava em processo de inclinação para baixo. Esse aumento do volume de água influencia em uma maior rapidez de descarga, fazendo com que alguma quantidade de água não seja medida. Outro fato observado foi o acúmulo de gotas na báscula, fazendo com que o tombamento, em alguns momentos, ocorresse antes do momento correto.

Estes valores não diferenciaram significativamente dos encontrados por Sanches *et al.* (2017), no desenvolvimento de um pluviômetro utilizando um microcontrolador como suporte a leitura dos valores de precipitação. Os autores encontraram um erro de 8% comparado ao pluviômetro TR-525M da Texas Electronics. Já Dulnik (2006), no desenvolvimento de um pluviógrafo encontrou erro médio próximo desse trabalho, ao comparar com o Pluviômetro Ville de Paris e um pluviógrafo de Sifão, obtendo erros de 4,4% e 6% respectivamente. Braga *et al.* (2008), avaliando a performance de 7 pluviômetros de báscula encontrou erro máximo variando de 1,13% a 17,77%.

Na comparação dos dados de chuva não foram utilizados os mesmos critérios estatísticos empregados para as grandezas radiação, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento em virtude do volume de chuva aplicado ter sido constate, 283,2 ml que corresponde a 10 mm de chuva, para todos os ensaios. A medição do volume de chuva limitou-se na contagem do número de tombamento da báscula para o mesmo volume de chuva aplicado em intervalos de tempo diferentes.

De acordo com os testes realizados, foi possível constatar que o pluviógrafo desenvolvido apresentou comportamento estável, realizando leituras com boa precisão e fornecendo dados confiáveis, com um erro máximo de 5%. Observa-se que apesar de existir uma diferença entre o valor real e o registrado há pouca variação entre as medições, constituindo-se uma alternativa viável para o monitoramento da precipitação.

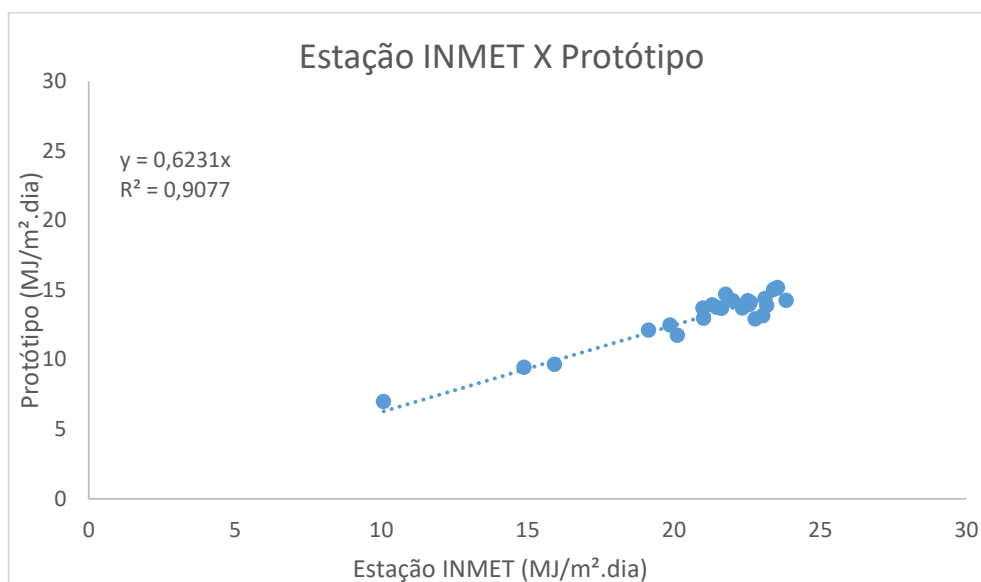
4.2 Avaliação dos dados meteorológicos coletados no Campus Rural da UFS

A coleta de dados correspondeu ao período de 01 de dezembro de 2017 a 30 de dezembro de 2017, com o intuito de avaliar o Erro Padrão da Estimativa (EPE) e o Erro da Estimativa Ajustado (EPEA) para radiação solar; e a comparação dos valores de temperatura,

umidade relativa do ar, velocidade do vento e volume de chuva, com os da estação meteorológica presente no campus rural, Irriplus E5000, com a finalidade de averiguar se os valores encontrados estavam em conformidade com os valores da região.

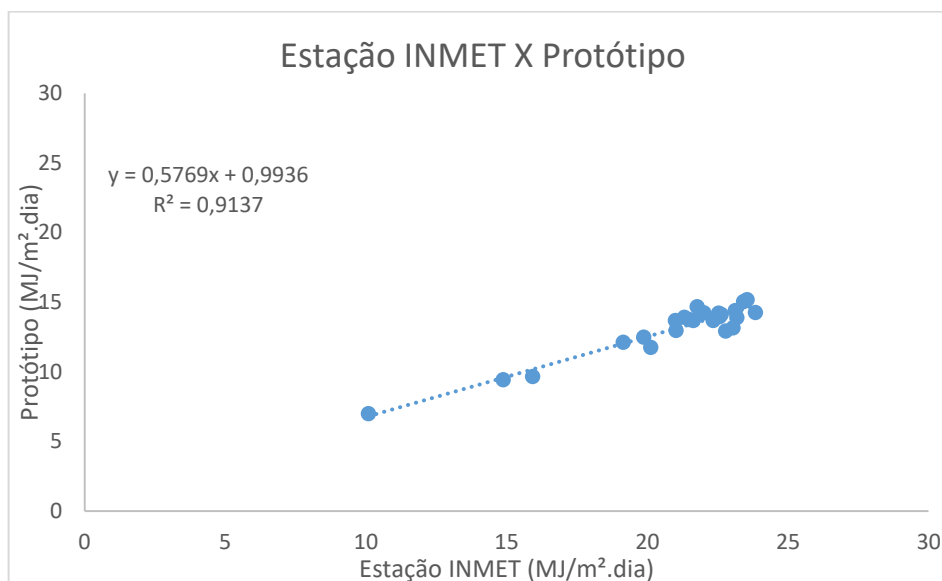
Para radiação solar o Erro Padrão da Estimativa (EPE) encontrado foi de 8,19 MJ/m².dia, o Erro Padrão da Estimativa ajustado em relação a regressão linear forçada pela origem (EPEAco) foi de 0,92 MJ/m².dia e o Erro Padrão da Estimativa ajustado em relação a regressão linear completa (EPEAcc) foi de 0,96 MJ/m².dia. As Figuras 52 e 53 representam a análise da regressão linear entre os valores da Estação do INMET e os do Protótipo, piranômetro desenvolvido, para regressões forçada pela origem, Figura 52, e regressão completa, Figura 53.

Figura 52 - Diagrama de dispersão da Radiação solar INMET e Protótipo sem o intercepto



Fonte: Autor, 2018

Figura 53 - Diagrama de dispersão da Radiação solar INMET e Protótipo

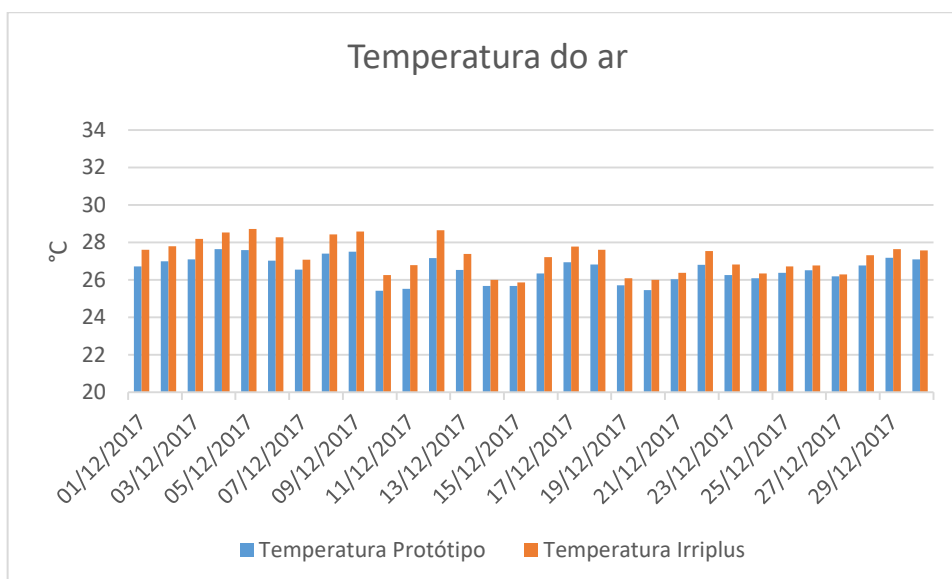


Fonte: Autor, 2018

Com os valores de EPE, EPEAco e EPEAcc foi possível avaliar de forma quantitativa o erro do piranômetro desenvolvido, de forma que o protótipo possuía um erro de 8,19 MJ/m².dia e após o ajuste esse erro caiu para menos de 1 MJ/m².dia, considerado um bom resultado, aprovando o ajuste do piranômetro desenvolvido. Dessa forma, esse ajuste foi utilizado para o cálculo da evapotranspiração de referência.

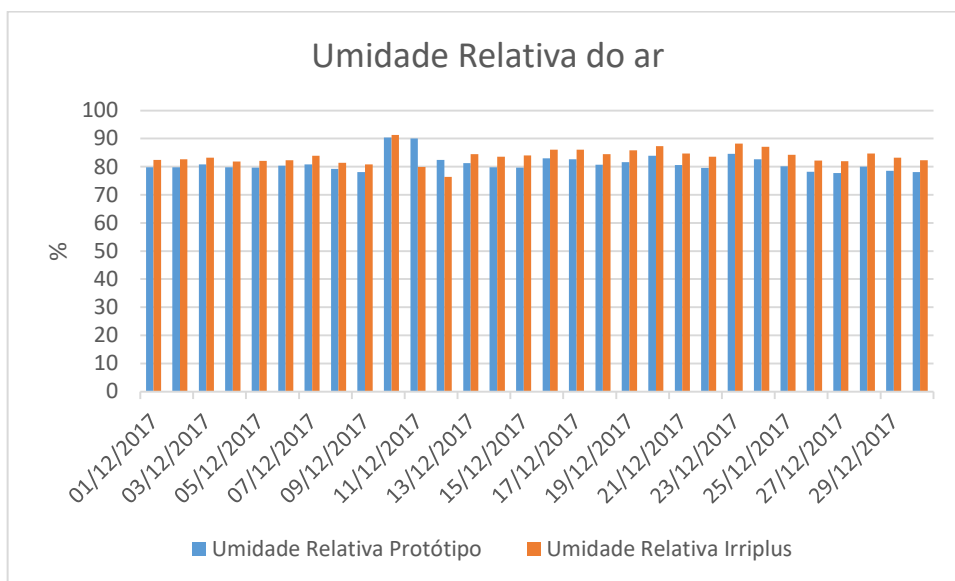
Com relação a comparação dos valores de temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do vento e volume de chuva, observa-se através das Figuras 54, 55, 56 e 57, a grande semelhança entre os valores encontrados pelas duas estações meteorológicas.

Figura 54 - Comparação dos valores diários de temperatura do ar



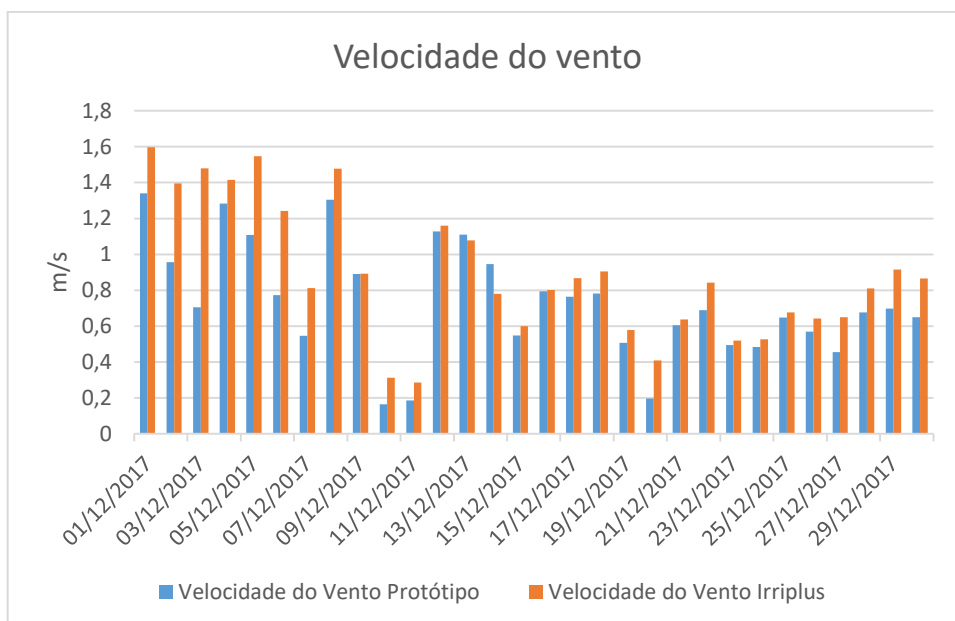
Fonte: Autor, 2018

Figura 55 - Comparação dos valores diários de umidade relativa do ar



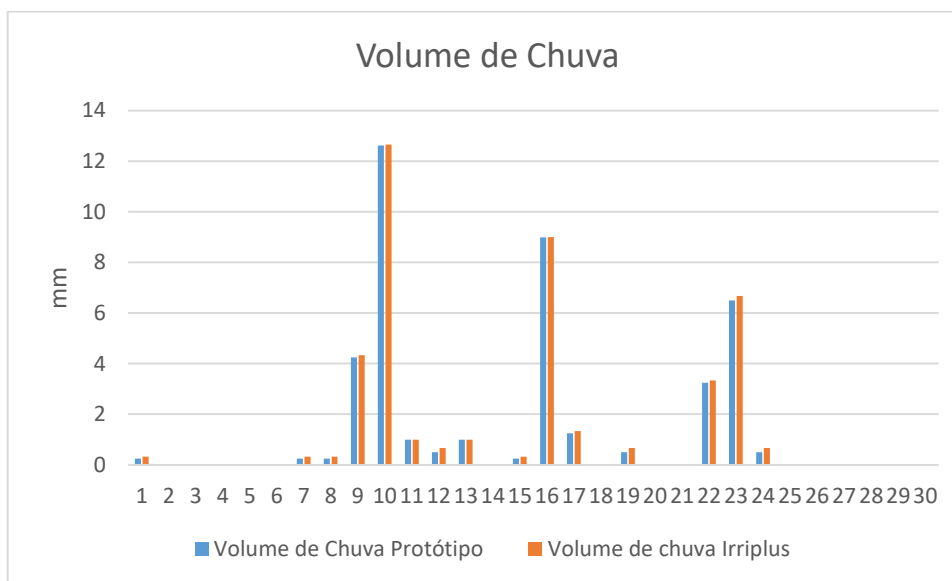
Fonte: Autor, 2018

Figura 56 - Comparação dos valores diários da velocidade do vento



Fonte: Autor, 2018

Figura 57 - Comparação dos valores diários do volume de chuva



Fonte: Autor, 2018

Após o período de teste foi realizada uma avaliação da periodicidade dos valores meteorológicos e não foram encontrados problemas na leitura e armazenamento dos dados.

A pequena diferença encontrada na velocidade do vento entre os dois anemômetros ocorreu devido ao desnível do terreno, em torno de 4 metros, com relação ao local da instalação das duas estações meteorológicas, o que possibilitou a diferenciação da velocidade. O local da instalação da estação meteorológica desenvolvida está em conformidade com o local onde foi realizado o experimento com a cultura, na direção predominante do vento, representando melhor os efeitos advectivos na parcela.

Através dos valores obtidos de temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do vento e volume de chuva, constatou-se que os valores estavam em conformidade com os valores da região.

4.3 Avaliação do sistema automático de irrigação com uma cultura hipotética

O período de avaliação correspondeu de 05 de fevereiro de 2018 a 16 de março de 2018, ou seja 40 dias, de forma que não existia ainda nenhuma cultura plantada nos canteiros, apenas uma simulação para avaliar a funcionalidade do sistema em calcular a evapotranspiração da cultura e o gerenciamento do sistema de irrigação.

As informações meteorológicas foram lidas diariamente e armazenadas em um banco de dados presente na estação meteorológica. Dessa forma o sistema às 9 h calculava a

evapotranspiração de referência (ET_o), pelo método de Penman-Monteith, utilizando os valores das variáveis meteorológicas armazenadas no banco de dados.

A tabela 11, representa as informações das variáveis meteorológicas necessárias para o cálculo da evapotranspiração, método de Penman-Monteith, coletadas pela estação meteorológica para cada dia do experimento.

Tabela 11 - Temperatura Máxima (T_{máx}), Temperatura Mínima (T_{mín}), Umidade Relativa Máxima (U_{máx}), Umidade Relativa Mínima (U_{mín}), Velocidade do Vento a 2 metros de altura (U₂) e Radiação Solar (R_s) para cada dia do experimento da alface.

(Continua)						
Data	T _{máx} (°C)	T _{mín} (°C)	U _{máx} (%)	U _{mín} (%)	U ₂ (m/s)	R _s MJ/m ² .dia
05/02/2018	33.9177	24.4934	95.4371	49.3708	0.60	20.9263
06/02/2018	33.3218	25.2085	92.5484	58.5075	0.60	19.15
07/02/2018	34.0735	25.2268	92.8439	56.1549	0.60	17.7394
08/02/2018	33.7343	24.9059	94.6384	59.1421	1.10	19.6434
09/02/2018	33.9268	23.6958	95.645	56.7568	0.95	18.447
10/02/2018	33.8627	22.8341	94.0365	50.1149	0.92	17.8815
11/02/2018	33.5785	20.973	96.6627	46.6025	0.68	19.1579
12/02/2018	34.0093	20.918	97.0675	51.1106	0.67	19.1535
13/02/2018	29.5631	23.7142	98.2274	73.9031	0.60	9.16792
14/02/2018	33.0101	23.2099	96.6408	52.1282	0.74	18.551
15/02/2018	30.4523	22.339	98.1617	62.1731	0.50	13.1808
16/02/2018	33.1843	22.4582	98.3259	54.3495	0.61	20.8202
17/02/2018	28.9763	23.3383	98.0414	79.6695	0.60	6.45744
18/02/2018	33.4135	21.7981	98.293	57.5118	0.60	16.5228
19/02/2018	33.2026	23.0449	98.3368	54.2072	0.60	18.6121
20/02/2018	33.6885	21.6698	98.4353	58.1464	0.60	16.5084
21/02/2018	33.7527	21.3489	98.7964	54.8419	0.60	18.1525
22/02/2018	34.6878	22.6324	97.9101	50.1587	0.62	21.1943
23/02/2018	35.3753	23.5216	96.969	50.3337	0.54	19.6679
24/02/2018	34.046	22.4032	98.118	52.4127	0.60	20.4476
25/02/2018	33.2118	22.4674	97.1003	44.9174	0.60	20.3991
26/02/2018	33.9177	21.2114	98.3915	51.4279	0.60	20.4177
27/02/2018	34.5136	22.8799	98.5228	51.1106	0.60	20.7593
28/02/2018	30.2048	23.0358	97.5052	67.3268	0.60	10.8782
01/03/2018	31.9008	22.4582	98.6432	65.5214	0.60	11.7835
02/03/2018	34.156	23.2466	97.6365	56.9537	0.60	17.8692
03/03/2018	33.0559	23.3108	98.107	58.42	0.60	17.7507
04/03/2018	33.661	21.679	98.8511	57.6868	0.60	21.1858
05/03/2018	34.7886	21.1931	98.5447	51.5592	0.50	20.5032
06/03/2018	35.4578	22.7974	97.6693	52.3799	0.60	20.3624
07/03/2018	36.4296	22.8066	99.3435	51.034	0.60	20.3742
08/03/2018	37.0438	24.0717	94.8791	47.0402	0.60	16.7935
09/03/2018	35.0178	23.9342	96.0718	51.0231	0.60	19.9736
10/03/2018	34.7061	24.0075	96.214	48.6596	0.60	20.4642
11/03/2018	36.4113	23.7967	93.6426	48.6924	0.60	19.1196

Data	T _{máx} (°C)	T _{mín} (°C)	U _{máx} (%)	U _{mín} (%)	U ₂ (m/s)	(Conclusão) R _s MJ/m ² .dia
12/03/2018	36.8238	23.2191	97.6912	50.4322	0.60	13.8578
13/03/2018	36.9888	23.8517	97.3411	46.2304	1.04	16.6503
14/03/2018	34.7244	23.2099	98.0961	46.701	1.43	21.2536
15/03/2018	32.9642	22.1007	99.1465	56.9647	0.6	4.24738
16/03/2018	33.6335	22.4307	95.459	47.073	1.30	12.9387

Fonte: Autor, 2018.

A estação meteorológica se comportou de forma estável na coleta dos dados meteorológicos no período do experimento, apresentando falhas na coleta desses valores apenas nos dias 12, 15 e 16 de março. No dia 12 de março ocorreram oscilações na energia elétrica do Campus Rural no período das 11 h até às 16 h, de forma que essas oscilações prejudicaram a coleta dos dados, ocasionando uma perda em torno de 10% dos dados coletados. Diante disso, uma vez que o horário do ocorrido foi durante o dia, comprometeu principalmente o valor da medição da radiação solar.

Nos dias 15 e 16 de março o problema ocorreu pela falta de energia elétrica das 09 h 01 min do dia 15 de março às 11 h 09 min do dia 16 março. Nesse período a estação meteorológica não coletou nenhum valor das grandezas meteorológicas comprometendo o cálculo da evapotranspiração. Esses problemas só ocorreram devido a estação meteorológica ter sido instalada no Campus Rural utilizando energia elétrica e consequentemente a sua falta comprometeu a coleta dos dados. A utilização dessa fonte de energia ocorreu em função da bomba de irrigação só funcionar com energia elétrica e com isso foi utilizada a mesma fonte de energia para alimentar a estação meteorológica.

No aspecto da periodicidade do armazenamento dos dados meteorológicos a estação se comportou de forma estável, com valores coerentes com os da região, apresentando eficiência, viabilidade e confiabilidade. A tabela 12 apresenta os valores calculados pela estação meteorológica para Evapotranspiração de Referência (E_{To}), Evapotranspiração da Cultura (E_{Tc}), definição do Coeficiente da Cultura (K_c) em função do estágio de desenvolvimento da planta, volume de chuva e o tempo necessário de irrigação.

Tabela 12 - Valores da Evapotranspiração de Referência (ET_o), Evapotranspiração da Cultura (ET_c), Coeficiente da Cultura (K_c), Volume de Chuva e o Tempo de irrigação para cada dia do experimento da alface.

Data	ET _o (mm)	ET _c (mm)	K _c	Chuva (mm)	Tempo (minutos)
05/02/2018	4.62758	3.93344	0.85	0	119
06/02/2018	4.28971	3.64625	0.85	0	111
07/02/2018	4.08614	3.47322	0.85	0	105
08/02/2018	4.58596	3.89807	0.85	0	118
09/02/2018	4.31035	3.6638	0.85	0	111
10/02/2018	4.24149	3.60526	0.85	0	109
11/02/2018	4.24308	3.60662	0.85	0	109
12/02/2018	4.24041	3.60434	0.85	0.25	102
13/02/2018	2.22894	1.89459	0.85	23.25	0
14/02/2018	4.18158	3.55434	0.85	0	108
15/02/2018	2.9692	2.52382	0.85	4.50	0
16/02/2018	4.46436	3.88399	0.87	0.25	110
17/02/2018	1.69449	1.50809	0.89	40.25	0
18/02/2018	3.7109	3.37691	0.91	10	0
19/02/2018	4.1061	3.81867	0.93	0.25	108
20/02/2018	3.71361	3.52793	0.95	0	107
21/02/2018	4.00036	3.88035	0.97	0	118
22/02/2018	4.6423	4.59588	0.99	0	139
23/02/2018	4.40834	4.45243	1.01	0	135
24/02/2018	4.44554	4.5789	1.03	0.50	124
25/02/2018	4.40548	4.62576	1.05	0	140
26/02/2018	4.38889	4.60833	1.05	0	140
27/02/2018	4.54314	4.77029	1.05	0.25	137
28/02/2018	2.57655	2.70537	1.05	18.25	0
01/03/2018	2.78614	2.92545	1.05	1	59
02/03/2018	4.01363	4.21432	1.05	0	128
03/03/2018	3.92653	4.12286	1.05	0.25	117
04/03/2018	4.49124	4.71581	1.05	0.25	135
05/03/2018	4.3859	4.60519	1.05	0.50	124
06/03/2018	4.51629	4.74211	1.05	0.25	136
07/03/2018	4.58056	4.80959	1.05	0.25	138
08/03/2018	4.04256	4.20426	1.04	0	127
09/03/2018	4.46018	4.59399	1.03	0	139
10/03/2018	4.52977	4.62036	1.02	0	140
11/03/2018	4.39497	4.43892	1.01	0	134
12/03/2018	3.46325	3.46325	1	0	105
13/03/2018	4.32544	4.28219	0.99	0.50	115
14/03/2018	5.11512	5.01282	0.98	0	152
15/03/2018	1.60454	1.55641	0.97	0	48
16/03/2018	3.64608	3.50024	0.96	0	106

Fonte: Autor, 2018.

Como pode ser observado na tabela 12, o sistema estimou a evapotranspiração de referência utilizando os dados meteorológicos, tabela 11, pelo método Penman-Monteith, definiu o coeficiente da cultura em função do estágio de desenvolvimento da planta e em

seguida calculou a evapotranspiração da cultura. O tempo de irrigação foi calculado utilizando informações do volume de chuva, evapotranspiração da cultura, vazão do microaspersor e seu raio de alcance de área molhada.

Em todos os 40 dias do experimento, o sistema conseguiu calcular a evapotranspiração da cultura da alface e definir o tempo necessário de irrigação, mesmo nos dias em que ocorreram problemas com a energia elétrica no Campus Rural. Isso foi possível devido à rotina computacional para o cálculo da evapotranspiração e definição do tempo de irrigação estar programada para dois turnos, sendo o primeiro pela manhã às 09 h e o segundo a tarde às 14 h. Caso existisse a cultura plantada nos canteiros o que não teria ocorrido era a irrigação no dia 15 de março e no dia 16 de março no turno da manhã em função da falta de energia elétrica.

Durante o período em questão, foram realizados diversos testes com o sistema de acionamento e desligamento do motor para irrigação dos canteiros. Em todos eles o sistema se comportou de forma estável, ligando e desligando o motor no horário programado.

Dessa forma, foi possível verificar a funcionalidade, eficiência e confiabilidade da estação meteorológica e do sistema de irrigação em coletar os dados necessários para estimativa da evapotranspiração da cultura, definição e gerenciamento do tempo de irrigação, instalado esse em condições externas, propícias a intempéries e interações humanas, disposto a erros e mau uso, estando pronto para ser testado com uma cultura plantada nos canteiros.

4.4 Avaliação do sistema automático de irrigação com a cultura do coentro

O período de avaliação correspondeu de 22 de março de 2018 a 12 de abril de 2018 e avaliou a funcionalidade do sistema em calcular a evapotranspiração da cultura, o gerenciamento do sistema de irrigação, o uso adequado da água e energia elétrica, como também sua possível contribuição no incremento da produtividade da região.

As informações meteorológicas foram lidas diariamente e armazenadas no banco de dados presente na estação meteorológica. Durante o período do experimento não foi encontrado nenhum problema de leitura e armazenamento das variáveis meteorológicas. Os valores encontrados para cada dia do experimento estão na tabela 13.

Tabela 13 – Temperatura Máxima (T_{máx}), Temperatura Mínima (T_{mín}), Umidade Relativa Máxima (U_{máx}), Umidade Relativa Mínima (U_{mín}), Velocidade do Vento a 2 metros de altura (U₂) e Radiação Solar (R_s) para cada dia do experimento do coentro.

Data	T _{máx} (°C)	T _{mín} (°C)	U _{máx} (%)	U _{mín} (%)	U ₂ (m/s)	R _s MJ/m ² .dia
22/03/2018	34.4769	23.7233	96.0718	47.8499	1.32	21.3207
23/03/2018	33.3401	23.6041	98.5119	60.4005	0.84	18.3325
24/03/2018	31.6808	22.6691	99.4967	66.9986	0.51	12.2698
25/03/2018	33.4501	22.6691	99.3872	55.0607	0.63	17.9528
26/03/2018	32.5059	22.8432	98.4353	54.6996	0.61	15.7996
27/03/2018	32.9092	23.1916	98.304	57.6978	0.64	15.1662
28/03/2018	32.625	22.614	98.9714	60.5865	0.46	15.5188
29/03/2018	32.7717	22.6049	99.442	52.0954	0.80	18.97
30/03/2018	33.2851	22.339	98.2711	60.8601	0.55	12.1168
31/03/2018	33.3218	22.0915	98.0085	55.1811	0.68	15.3738
01/04/2018	33.0559	21.1381	99.5295	53.2553	0.44	18.4352
02/04/2018	33.771	22.2565	98.7964	51.1872	0.62	19.8166
03/04/2018	34.211	21.7981	99.7812	49.2942	0.62	19.7698
04/04/2018	33.7068	22.2198	99.9891	57.2601	0.81	18.8831
05/04/2018	33.9635	23.3383	99.2231	57.7087	0.82	17.7793
06/04/2018	33.0468	22.8341	99.2997	60.4661	0.41	13.6182
07/04/2018	33.4501	22.614	99.5514	57.1726	0.55	18.9611
08/04/2018	33.881	22.6049	98.9714	50.3666	0.54	18.8202
09/04/2018	32.9001	21.3764	102.418	54.6668	0.60	16.8694
10/04/2018	32.9092	20.6063	100.733	53.4741	0.60	17.9247
11/04/2018	32.68	22.4032	99.7264	60.4333	0.41	14.7244
12/04/2018	28.3805	22.6415	99.7812	81.5735	0.60	6.9767

Fonte: Autor, 2018.

Utilizando-se dos valores armazenados no banco de dados (Tabela 13), o sistema às 09 horas de cada dia do experimento calculou a evapotranspiração de referência (E_{To}), pelo método de Penman-Monteith, definiu o K_c em função do estágio de desenvolvimento da planta, calculou a evapotranspiração da cultura e em seguida definiu o tempo de irrigação. A tabela 14 apresenta os valores calculados pela estação meteorológica para Evapotranspiração de Referência (E_{To}), Evapotranspiração da Cultura (E_{Tc}), Coeficiente da Cultura (K_c); volume de chuva e o tempo necessário de irrigação.

Tabela 14 - Valores da Evapotranspiração de Referência (E_{To}), Evapotranspiração da Cultura (E_{Tc}), Coeficiente da Cultura (K_c), Volume de Chuva e o Tempo de irrigação para cada dia do experimento do coentro.

(Continua)					
Data	E _{To} (mm)	E _{Tc} (mm)	K _c	Chuva (mm)	Tempo (minutos)
22/03/2018	5.0296	4.27516	0.85	11.75	0
23/03/2018	4.0896	3.47616	0.85	10	0
24/03/2018	2.79112	2.42827	0.87	13.50	0
25/03/2018	3.93326	3.50060	0.89	8	0
26/03/2018	3.52426	3.20707	0.91	6	0
27/03/2018	3.44497	3.20382	0.93	4.50	0

(Conclusão)					
Data	ET _o (mm)	ET _c (mm)	K _c	Chuva (mm)	Tempo (minutos)
28/03/2018	3.38085	3.21180	0.95	3.50	0
29/03/2018	4.14048	4.01626	0.97	4	2
30/03/2018	2.86274	2.83411	0.99	16.25	0
31/03/2018	3.4963	3.53126	1.01	0	107
01/04/2018	3.82521	3.93996	1.03	0.25	112
02/04/2018	4.22312	4.43428	1.05	0	134
03/04/2018	4.22843	4.43986	1.05	0	134
04/04/2018	4.12477	4.33101	1.05	0	131
05/04/2018	3.99337	4.19303	1.05	10	0
06/04/2018	3.03141	3.18298	1.05	11	0
07/04/2018	4.00939	4.20985	1.05	0	128
08/04/2018	4.0105	4.21102	1.05	5.25	0
09/04/2018	3.61269	3.79332	1.05	4	0
10/04/2018	3.75998	3.94799	1.05	4.50	0
11/04/2018	3.17755	3.33642	1.05	4.50	0
12/04/2018	1.69286	1.77750	1.05	33.25	0

Fonte: Autor, 2018.

Como pode ser observado na Tabela 14, o sistema estimou de forma correta a Evapotranspiração da Cultura e definição do tempo de irrigação. Observa-se que durante o experimento choveu 17 dias, de forma que na maioria dos dias não houve necessidade de irrigação.

No período inicial do experimento do coentro, 16 primeiros dias após o plantio, não ocorreu chuva e com isso houve a necessidade da irrigação. As plantas foram irrigadas de forma semelhante com o intuito de assegurar uma boa germinação e estabelecimento da cultura. Após o período de estabelecimento da cultura iniciou-se o período de chuva e devido à grande pluviosidade houve pouca necessidade de irrigação.

Através da tabela 15, observa-se que durante o período de 22 dias após o estabelecimento da cultura e a sua colheita, o coentro foi irrigado 8 dias. Sendo pelos funcionários do Campus Rural 6 dias (parcela 1) e 7 dias pelo Sistema automático de Irrigação (parcela 2), não ocorrendo semelhança em todos os dias irrigados

Tabela 15 - Dias de irrigação do experimento do coentro e o volume de água aplicado por parcela.

(Continua)		
Data da Irrigação	Volume de água aplicado (litros - Parcela 1)	Volume de água aplicado (litros - Parcela 2)
23/03/2018	690	0
29/03/2018	0	21
01/04/2018	648	922
02/04/2018	815	1219
03/04/2018	991	798

(Conclusão)		
Data da Irrigação	Volume de água aplicado (litros - Parcela 1)	Volume de água aplicado (litros - Parcela 2)
04/04/2018	0	1505
05/04/2018	436	1430
08/04/2018	315	501
Total	3895	6396

Fonte: Autor, 2018.


Através das tabelas 14 e 15 observa-se que os critérios adotados pelos funcionários do campus rural para irrigação não condizem com a realidade climática. No dia 23 de março não haveria necessidade de irrigação uma vez que no dia anterior choveu 11,75 mm e a evapotranspiração da cultura foi de 4.27 mm, sendo o volume de chuva 275% maior do que a perda por evapotranspiração e assim mesmo os funcionários irrigaram a parcela 1.

Nos outros dias houve a predominância dos funcionários do campus rural (parcela 1) irrigarem um volume menor que a evapotranspiração da cultura do dia anterior ou não irrigar, como foi o caso do dia 04 de abril de 2018.

A tabela 14 demonstra que durante o período do experimento, em apenas 7 dias deveria ter sido aplicada a irrigação na cultura, uma vez que apenas nesses dias o volume de chuva foi menor do que a evapotranspiração da cultura. Já o sistema de irrigação da parcela 2 irrigou nos dias que havia necessidade de irrigação, diferentemente do adotado pelo campus rural (parcela 1). Dessa forma, observa-se que nos dias 04 e 05 de abril a cultura, da parcela 1, pode ter passado por um déficit hídrico uma vez que deveria receber uma lâmina de irrigação em torno de 4 mm e recebeu valores bem menores.

Muitas das culturas cultivadas no Campus Rural são irrigadas não levando em consideração os dados climáticos da região, como pode ser observado na Figura 58 que demonstra a orientação dada aos funcionários terceirizados quanto ao tempo de irrigação e dias de irrigação para cada cultura.

Figura 58 - Tabela de Irrigação das culturas do Campus Rural – UFS

IRRIGAÇÃO DAS CULTURAS DO

CAMPUS RURAL
 Universidade Federal de Sergipe

	Viveiro de mudas	Café	Banana	Coer	Uva	Mandioca	Jardim	Caixa
SEGUNDA	10 min	40 min	40 min	2 hrs	2 hrs	2 hrs		
TERÇA	10 min							
QUARTA	10 min	40 min	40 min	2 hrs	2 hrs	2 hrs		
QUINTA	10 min							
SEXTA	10 min	40 min	40 min	2 hrs	2 hrs	2 hrs		

OBS: * Viveiro de mudas \Rightarrow 3 vezes ao dia

Janaylla Souza de Menezes

Fonte: Autor, 2018.

Durante o período de experimentação não ocorreram problemas com relação a leitura e armazenamento das variáveis meteorológicas, na estimativa da evapotranspiração da cultura, definição do tempo de irrigação e no mecanismo de acionamento e desligamento automático do sistema de irrigação, porém outros problemas foram encontrados, mas nenhum deles relacionados à estação meteorológica e ao sistema automático de irrigação.

Os problemas encontrados foram nos dias 01, 03 e 08 de abril. No dia 01 de abril, no turno da tarde, ocorreu o rompimento de uma conexão durante o horário da irrigação. A manutenção foi realizada de forma rápida de forma que comprometeu em torno de 20% do volume de água que deveria ter sido aplicada. Já nos dias 03 e 08 de abril ocorreu um problema de entrada de ar no corpo da bomba que consequentemente comprometeu a irrigação. Todos os problemas foram solucionados, mas em virtude do sistema automático não compreender a existência desses ocorridos comprometeu o volume d'água aplicado.

Trabalho semelhante foi realizado por Giacomelli (2011), ao desenvolver um equipamento, utilizando um microcontrolador PIC, capaz de calcular o tempo de irrigação utilizando dados de uma estação meteorológica. De forma análoga Carvalho (2011), implementou rotinas de programação em um CLP para o controle de irrigação. Em ambos os trabalhos os resultados mostraram a viabilidade do desenvolvimento de soluções para

automação do processo de irrigação. A restrição dos trabalhos desenvolvidos pelos autores foi a necessidade de uma estação meteorológica próxima a área a ser cultivada.

Já Pinto (2008), no desenvolvimento de um sistema automático de irrigação, através da automatização da leitura dos dados de um Irrigâmetro para a definição do tempo de irrigação, obteve bons resultados em períodos sem pluviosidade, uma vez que a precipitação alterava o nível de água no evaporatório do Irrigâmetro, comprometendo o funcionamento correto do sistema. Dessa forma, em períodos sem chuva o sistema mostrou ser confiável e eficiente, tornando-se uma alternativa para a realização do manejo de irrigação.

Por outro lado, Macedo *et al.* (2010), avaliaram o desempenho de um sistema de irrigação automatizado através da medição da tensão de água no solo. Os sensores apresentaram falhas de leitura, proporcionando tanto irrigações com déficit, como excesso na aplicação de água, o que prejudicou o desenvolvimento da cultura. No entanto, quando os sensores funcionaram perfeitamente se mostrou um sistema de fácil uso. Um trabalho semelhante foi desenvolvido por Reis *et al.* (2015), onde o protótipo desenvolvido gerenciava o sistema de irrigação ao comparar a leitura da umidade do solo com um valor definido como padrão. O sistema realizava a leitura da umidade do solo a uma profundidade de apenas 4 cm, o que não é o recomendado conforme Marouelli (2008). O autor orienta que a leitura deve ser realizada em pelo menos duas profundidades, sendo uma com 50% da profundidade efetiva do sistema radicular e a outra no limite inferior do sistema radicular.

Diferentemente, Guimarães e Bauchspiess (2012), utilizando um microcontrolador arduino, desenvolveu um software capaz de gerenciar um controle automático de irrigação, com baixo custo, onde era possível a programação dos horários, frequência e tempo de aplicação da lâmina d'água. O sistema não foi testado em campo, mas testes de ativação e controle em laboratório foram realizados, simulando o sistema em campo e obtendo bons resultados. Já Souza (2001), implementou um sistema utilizando um computador, que controlava válvulas solenoides, através da porta paralela, nos turnos e horários pré-estabelecidos. O inconveniente dos dois sistemas propostos é o fato de funcionarem utilizando critérios fixos para irrigação da cultura, como tempo e horário da irrigação, não sendo possível garantir a aplicação correta da necessidade hídrica da cultura.

Por fim, Queiroz *et al.* (2013), desenvolveu um circuito eletrônico para o manejo automático da irrigação em casas de vegetação. O controlador foi projetado para acionar o sistema de irrigação a partir de uma variação definida no nível de água de um tanque de evaporação. Alguns problemas foram encontrados pelos autores, desde interferência externa

por animais, problemas no dispositivo de acionamento do sistema de irrigação e quedas de energia. Porém, os resultados mostraram que o protótipo construído tem potencial para utilização no manejo automático da irrigação.

Como pode ser observado, diversas pesquisas vêm contribuindo com a implementação de soluções para automação do processo de irrigação com o objetivo de proporcionar uma tomada de decisão eficiente. Detecta-se desta forma a quantidade necessária de água para a cultura, consequentemente é fornecida a quantidade de água exata que a mesma necessita, evitando assim desperdícios.

Como foi mencionado anteriormente, a cultura desse experimento foi o coentro. Este foi colhido com 38 dias após a semeadura e apresentou aparência ótima para ser comercializado e consumido (Figura 59). Não foram detectadas pragas na cultura, apesar de terem sido cultivados em condições de adensamento.

Figura 59 – Coentro colhido com 38 dias após a semeadura



Fonte: Autor, 2018

Nas tabelas 16 a 21 encontram-se os valores de massa fresca e massa seca do coentro submetidos a análise de variância, com o teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

Tabela 16 – Resumo da análise de variância para massa fresca

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Parcela_1	4	4359	1089,75	200963,6
Parcela_2	4	7006	1751,5	326281,7

Fonte: Autor, 2018.

Tabela 17 – Resultados da análise de variância para massa fresca

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	875826,1	1	875826,1	3,322272	0,118176	5,987378
Dentro dos grupos	1581736	6	263622,6			
Total	2457562	7				

Fonte: Autor, 2018.

Tabela 18 – Teste de Tukey para massa fresca

Tratamentos	Médias	Resultado do teste
Parcela1	1089.750000	a1
Parcela2	1751.500000	a1

Fonte: Autor, 2018.

Tabela 19 - Resumo da análise de variância para massa seca

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Parcela_1	4	425	106,25	1107,583
Parcela_2	4	690	172,5	2903

Fonte: Autor, 2018.

Tabela 20 - Resultados da análise de variância para massa seca

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	8778,125	1	8778,125	4,37748	0,081346	5,987378
Dentro dos grupos	12031,75	6	2005,292			
Total	20809,88	7				

Fonte: Autor, 2018.

Tabela 21 - Teste de Tukey para massa seca

Tratamentos	Médias	Resultado do teste
Parcela1	106.250000	a1
Parcela2	172.500000	a1

Fonte: Autor, 2018.

Apesar da parcela 1 do campus rural não ter sido irrigada de forma adequada, aplicando a quantidade de água evapotranspirada pela cultura, observa-se, tabelas 18 e 21, que o coentro respondeu bem a umidade de água no solo decorrente do excesso de chuva durante o período do experimento.

As tabelas 18 e 21 demonstram que os resultados estatísticos foram iguais, não ocorrendo diferença significativa entre os dois tratamentos. Isto ocorreu devido ao grande aporte hídrico não ter sido a irrigação nas duas parcelas e sim a chuva que correspondeu a 90,9%, parcela 1, e 85,9%, parcela 2, da fonte hídrica. Dessa forma, uma vez que a soma do volume de chuva com a soma do volume de irrigação foi superior a necessidade hídrica da

cultura (ETc), no período do experimento em ambas as parcelas, já se esperava que a produção fosse igual como mostrado através do teste de Tukey.

No período do experimento, a cultura do coentro teve uma necessidade hídrica de 79,4 mm, tabela 14, mas durante os 22 dias choveu 150,25 mm, demonstrando que a chuva foi tão predominante e até excessiva que permitiu que ocorresse o processo de percolação de água no solo e a necessidade hídrica da cultura fosse atendida em sua plenitude nas duas parcelas.

Apesar do sistema ter sido utilizado em um período de chuva, o que representou o maior aporte hídrico da planta, foi possível observar que o sistema funcionou de forma adequada, só irrigando nos dias corretos e aplicando a lâmina d'água adequada nos dias em que houve necessidade de irrigação.

4.5 Capacitação dos agricultores do Perímetro Irrigado Porção da Ribeira

Correspondeu a terceira etapa do projeto e contou com a presença de agricultores de todos os setores do Perímetro Irrigado Porção da Ribeira, funcionário da COHIDRO e ENDAGRO. As Figuras 60 e 61 permitem visualizar a palestra realizada no dia 23 de agosto de 2018 no galpão da COHIDRO, onde foram demonstrados o funcionamento da estação meteorológica, do sistema de irrigação e a importância da realização do manejo de irrigação.

Figura 60 – Capacitação dos agricultores do Perímetro Irrigado Porção da Ribeira



Fonte: Autor, 2018.

Figura 61 – Participação dos agricultores nas atividades educativas

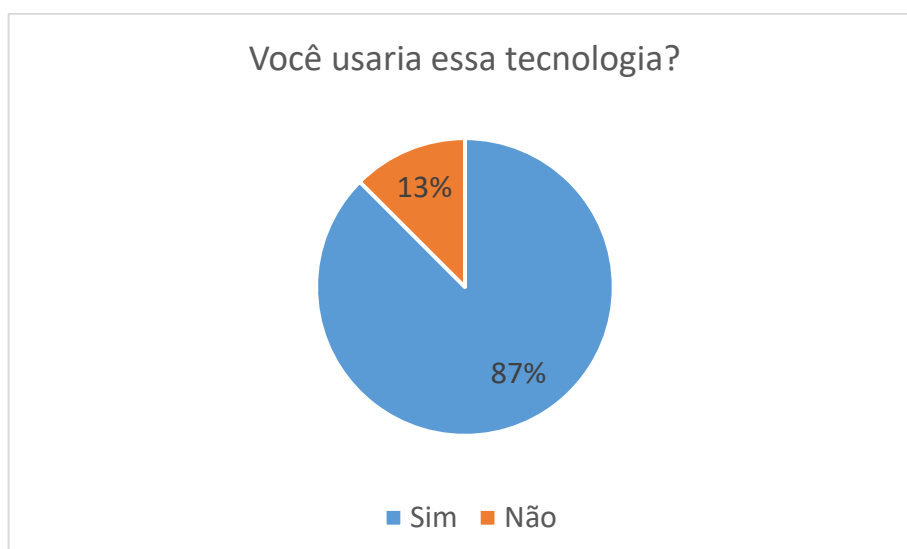


Fonte: Autor, 2018.

Logo após a apresentação o público presente pode utilizar o sistema livremente, realizando simulações, consultando os dados meteorológicos, tempo de irrigação e evapotranspiração da cultura, seja através da página WEB ou através do display, ambos presentes no sistema. Dessa forma possibilitou-se esclarecer todas as dúvidas referente a tecnologia desenvolvida.

Ao término da capacitação foi realizada uma pesquisa, com 32 agricultores, com o intuito de saber quantos deles teriam interesse em utilizar a tecnologia proposta no auxílio do manejo de irrigação em suas propriedades. Os resultados estão presentes na Figura 62.

Figura 62 – Quantidade de agricultores que estão dispostos a utilizar o sistema desenvolvido



Fonte: Autor, 2018.

Devido ao grande interesse em utilizar a tecnologia desenvolvida, Figura 62, ficamos de desenvolver outras estações para que possam ser instaladas no perímetro e consequentemente auxiliar os agricultores da região. O funcionário responsável pela gestão do perímetro irrigado Porção da Ribeira também teve interesse na aquisição de uma estação meteorológica com o intuito de orientá-lo no desenvolvimento das atividades realizadas pela COHIDRO no perímetro irrigado.

Esses resultados são considerados importantes devido a importância da conscientização dos produtores rurais, do Perímetro Irrigado Porção da Ribeira, quanto ao uso de tecnologias que auxiliem na realização do manejo de irrigação, levando a acreditar na relevância da qualificação dos agricultores para o uso racional da água e apresentação de tecnologias que os auxiliem no desenvolvimento de suas atividades.

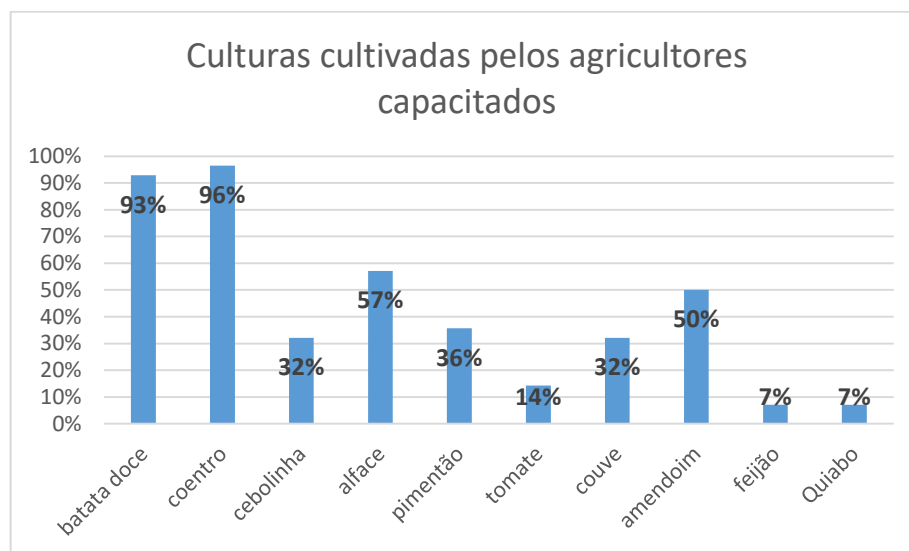
Trabalhos de capacitação do homem do campo também são desenvolvidos por diversos outros autores, como podemos observar através de Simoni *et al.* (2016), que por meio da qualificação dos agricultores foi possível ampliar os conhecimentos da comunidade em agricultura agroecológica, com consequente melhoria da qualidade de vida no campo e diminuição do impacto ambiental. Um outro trabalho foi realizado por Cavalcanti *et al.* (2018), que demonstraram a importância da capacitação dos agricultores de comunidades do Nordeste do Brasil, atingidas pela seca, a trabalharem com a tecnologia biossalina. Este trabalho possibilitou a comunidade ter os devidos cuidados com o solo, diminuindo o êxodo rural, mantendo as regiões atingidas pela seca urbanizadas e progredindo para o desenvolvimento da região.

A Agência Nacional das Águas (ANA) e a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), também preocupadas com uso adequado da água na agricultura irrigada, incentivam atividades educativas para conscientização dos agricultores em diversas regiões do Brasil. Uma delas é a de Camargo (2016), que elaborou um material, com o apoio da ANA, de Manejo de Irrigação com o intuito da conservação, uso racional e sustentável da água. Coelho *et al.* (2014), através da EMBRAPA, desenvolveram uma cartilha referente a sistemas e manejo de irrigação de baixo custo para agricultura familiar, que tem como objetivo fornecer a agricultores familiares informações e conhecimentos básicos de sistemas de irrigação, considerando seu uso voltado para a conservação da água, bem como informações sobre como usar a água para irrigar de modo a manter o solo com a umidade suficiente para uma produção adequada com o mínimo de perdas.

Como pode ser observado, diversos trabalhos demonstram a importância e a preocupação da qualificação do homem do campo, no uso de tecnologias que o ajudem a melhorar sua qualidade de vida e o desenvolvimento sustentável da região.

Retornando a pesquisa realizada neste trabalho, esta também traçou os tipos de culturas cultivadas pelos agricultores presentes na capacitação. A Figura 63 representa o cenário.

Figura 63 – Índices das culturas cultivadas pelos agricultores capacitados



Fonte: Autor, 2018.

Como pode ser observado, Figura 63, as hortaliças predominaram entre as culturas mais cultivada na região, seguidas pela batata doce. Mesmo que o protótipo tenha sido testado com hortaliças não impede o seu uso com qualquer uma das culturas cultivadas no perímetro.

Dessa forma, o grande percentual de agricultores interessados no uso de novas tecnologias demonstra a importância do uso de tecnologias que auxiliem esse público na tomada de decisões, principalmente no tocante ao uso racional da água, uma vez que é um bem vital para o abastecimento humano, para o desenvolvimento de atividades industriais e agrícolas, sendo de importância extrema para o ecossistema.

5 CONCLUSÕES

O acesso aos recursos hídricos gera conflitos em todas as regiões do mundo, e o aumento do consumo e escassez da água tem gerado o aumento da insegurança hídrica e os conflitos pela sua posse. A agricultura irrigada tem sido responsável por grande parcela da água utilizada, o que torna necessária a implementação de sistemas de irrigação eficientes, além da utilização de métodos que quantifiquem as necessidades hídricas das culturas, para que não haja desperdício.

Com a grande quantidade de elementos eletrônicos, eletromecânicos, mecânicos disponíveis no mercado e os recentes avanços no desempenho, facilidade de configuração, programação e custo dos microcontroladores foi possível fornecer uma alternativa viável para a automação do processo de coleta dos dados meteorológicos e gerenciamento de um sistema de irrigação, a custo baixo comparados aos atualmente comercializados.

Uma estação meteorológica automática foi projetada e desenvolvida com os cinco sensores necessários para o cálculo da demanda hídrica, utilizando o método de Penman-Monteith para a estimativa da evapotranspiração de referência.

Os sensores desenvolvidos, radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento, apresentaram valores confiáveis e próximos aos dos sensores de referência, obtendo valores para o coeficiente de determinação (R^2) acima de 0,96; demonstrando a grande similaridade existente entre os dados coletados.

Além disso foram encontrados bons resultados referentes ao coeficiente de correção de Pearson (r), o índice de concordância (d) e o índice de desempenho (c), para radiação solar, temperatura e umidade relativa do ar, o que indica um alto grau de correlação positiva entre os dados comparados. Para a velocidade do vento, os valores encontrados não foram satisfatórios, mas o que já era esperado uma vez que para os fenômenos físicos vento, precipitação e vazão a distribuição Normal não é a mais indicada e sim a distribuição de Weibull.

Com relação ao volume pluviométrico foi possível constatar que o pluviógrafo desenvolvido apresentou comportamento estável, realizando leituras com boa precisão e fornecendo dados confiáveis, com um erro máximo de 5%.

No aspecto da periodicidade do armazenamento dos dados meteorológicos, na estimativa da evapotranspiração da cultura, definição do tempo de irrigação e no mecanismo de acionamento e desligamento automático do sistema de irrigação, o sistema embarcado se comportou estável, de forma que não foram encontrados problemas. Foi possível observar que o sistema funcionou de modo adequado, só irrigando nos dias corretos e aplicando a lâmina

d'água adequada nos dias em que houve necessidade de irrigação. Com isso o sistema automático para manejo da irrigação utilizando um sistema embarcado mostrou ser confiável e eficiente.

O custo do equipamento desenvolvido ficou em torno de \$ 270,00 o que corresponde a 7% do valor de uma estação meteorológica automática, tendo ainda a possibilidade de fácil manutenção, com custo reduzido. Além do mais, possui as funcionalidades de gerenciamento e controle de um sistema de irrigação que as estações meteorológicas comercializadas não possuem.

Em se tratando da capacitação dos produtores rurais do perímetro irrigado Porção da Ribeira quanto ao uso da tecnologia desenvolvida, 87 % teve interesse em utilizar o sistema proposto. Esse resultado é considerado importante devido a relevância da conscientização dos produtores rurais, quanto ao uso de tecnologias que auxiliem na realização do manejo de irrigação, o que nos leva a acreditar na importância da qualificação dos agricultores para o uso racional da água e apresentação de tecnologias que os auxiliem no desenvolvimento de suas atividades.

Durante a capacitação, o público presente pode utilizar o sistema livremente, realizando simulações, consultando os dados meteorológicos, tempo de irrigação e evapotranspiração da cultura, seja através da página WEB ou através do display, ambos presentes no sistema, esclarecendo todas as dúvidas existentes.

Destarte, este trabalho promoveu o desenvolvimento de um produto para ser utilizado no processo de irrigação automatizada, com baixo custo, possibilitando o seu uso por agricultores da região em estudo.

Para a automação da agricultura esse sistema é relevante pela sua simplicidade, custo e capacidade de executar tarefas de rotina, tornando-as automáticas e independentes, permitindo aos produtores rurais, melhorar sua produção, diminuir custo e direcionar seu tempo e força de trabalho para outras finalidades.

Em se tratando do ecossistema permite contribuir com a racionalização da água utilizada na irrigação, possibilitando a agricultura irrigada manter-se sustentável em termos ambientais, contribuindo para a preservação dos mananciais. Além de cooperar com a diminuição do consumo de energia elétrica.

Além disso, o desenvolvimento dos dispositivos para leitura das variáveis climáticas e o sistema automatizado de armazenamento de dados permitiu o monitoramento dessas variáveis em tempo real, a um custo reduzido, contribuindo para diversos trabalhos futuros.

Diante disso, buscou-se, por meio deste trabalho interdisciplinar, apresentar uma tecnologia social, acessível ao agricultor familiar, que permite ao mesmo realizar manejo de irrigação, o que repercute no melhor desempenho econômico, social e na preservação do meio ambiente.

6 REFERÊNCIAS

- ABRAHA, M. G.; SAVAGE, M. J. Comparison of estimates of daily solar radiation from air temperature range for application in crop simulations. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.148, n. 3, p. 401–416, 2008.
- AGUIAR NETO, A. O.; PEREIRA, F. A. C.; BARROS, A. C.; MELO, A. S. Quanto e quando irrigar. In: AGUIAR NETO, A. O.; BASTOS, E. A. (Org.). **Princípios agrônômicos da Irrigação**. Brasília, DF: Embrapa, 2013.
- AIROLDI, R. P. S. **Análise do desempenho de gotejadores e da prevenção do entupimento em irrigação com água residuária**. Tese de doutorado em agronomia, Escola de Agricultura Luiz de Queiroz. Piracicaba-SP, 2007.
- ALBUQUERQUE, P. E. P. Estratégias de Manejo de Irrigação. In: ALBUQUERQUE, P. E. P.; DURÃES, F. O. M. (Org.) **Uso e manejo de irrigação**. Brasília, Embrapa, 2008.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300 p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; HOWELL, T. A.; JENSEN, M. E. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. **Agricultural Water Management**. v. 98, p. 899 – 920, 2011.
- ALVES, R. P. **Diversidade morfológica, agrônômica e potencial para produção de etanol de germoplasma de batata-doce**. Dissertação de mestrado em Agroecossistemas, Universidade Federal de Sergipe, 2014.
- AMORIM, D. M.; COSTA, D. S.; CARVALHO, P. G. S.; GARRIDO, M. S.; GONÇALVES, I. C. M. Comparação de dados obtidos a partir de sensores de temperatura e umidade relativa do ar protegidos em um abrigo meteorológico de PVC. **Energia na Agricultura**, v. 30, n. 2, 2015.
- ANDRADE, C. L. T.; BORGES JÚNIOR, J. C. F. Seleção do Método de Irrigação. In: ALBUQUERQUE, P. E. P.; DURÃES, F. O. M. (Org.) **Uso e manejo de irrigação**. Brasília, Embrapa, 2008.
- AUSTERLITZ, H. Analog signal transducers. In: AUSTERLITZ, H. **Data acquisition techniques using pcs**. 2. ed. San Diego: Academic Press, 2003.
- BARBOSA, G. S. O desafio do desenvolvimento sustentável. **Revista Visões**, v. 4, n. 1, p. 1-11, 2008.
- BARRETO, A. N.; FACCIOLI, G. G.; SILVA, A. A. G. Métodos e Sistema de Irrigação. In: BARRETO, A. N.; SILVA, A. A. G.; BOLFE, E. L. (Org.) **Irrigação e drenagem na empresa agrícola: impacto ambiental versus sustentabilidade**. Embrapa, 2004.
- BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8. ed., Viçosa: Ed. UFV, 2011.
- BLUM, R. Agricultura familiar: estudo preliminar da definição, classificação e problemática.

In: TEDESCO, J. C. (Org.) **Agricultura familiar: realidades e perspectivas**, 3. ed. Passo Fundo: UPF, 2001.

BORGES, V. P.; OLIVEIRA, A. S.; COELHO FILHO, M. A.; SILVA, T. S. M.; PAMPONET, B. M. Avaliação de modelos de estimativa da radiação solar incidente em Cruz das Almas, Bahia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 1, p. 74-80, 2010.

BRAGA, S. M.; BRAGA, A. S.; FERNANDES, C. V. S.; SANTOS, I. **Avaliação da performance de pluviômetros de báscula: sub-medição durante eventos extremos e novos esquemas de medição**. In: Anais do II Simpósio de recursos hídricos do sul-sudeste, 2008.

BRUNDTLAND, **Relatório da Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento - CLIMATE CHANGE 2014**. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>. Acesso em: novembro de 2018.

BUARQUE, S. C. **Construindo o desenvolvimento local sustentável: metodologia de planejamento**. Editora Garamond, 2002.

BURIOL, A. G.; ESTEFANEL, V.; HELDWEIN, A. B.; PRESTES, S. D. HORN, J. F. C. Estimativa da radiação solar global a partir dos dados de insolação, para Santa Maria – RS. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 42, n. 9, p. 1563-1567, 2012.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de deferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**. v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

CAMARGO, D. C. **Manejo da Irrigação: como, quando e quanto irrigar?** Fortaleza: INOVAGRI / IFCE, 2016.

CARDOSO, C. O.; SAMPAIO, C. A. P.; BIANCO, A. O.; PIAZZOLI, D. Construção e calibração de anemômetro de baixo custo. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 8, n. 2, p. 122-128, 2009.

CARGNELUTTI FILHO, A.; MATZENAUER, R.; MALUF, J. R. T.; SILVA, B. P. Tamanho de amostra para a estimativa das médias decendiais de radiação solar global no estado do Rio Grande do Sul. **Ciência e Agrotecnologia**, p. 1402-1410, 2007.

CARVALHO, A. C. A.; **Caracterização da rede pluviométrica do estado de Sergipe e aplicação das redes neurais para preenchimento de falhas**. Dissertação de mestrado em Desenvolvimento e Meio ambiente. Universidade Federal de Sergipe, 2007.

CARVALHO, D. M.; COSTA, J. E. Distribuição de hortaliças e raízes em Itabaiana/SE. **Mercator - Revista de Geografia da UFC**, v. 10, n. 21, p. 103-119, 2011.

CARVALHO, L. G.; RIOS, G. F.; MIRANDA, W. L.; NETO, P. C. Evapotranspiração de referência: Uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, n. 3, p. 456 a 465, 2011.

CARVALHO, H. B. **Automação como suporte à otimização do uso da água e energia na cultura do coco irrigado no município de Neópolis**. Dissertação de mestrado em

desenvolvimento e meio ambiente, Universidade Federal de Sergipe, 2011.

CASTELHANO, F. J.; ROSEGUINI, W. F. F. A utilização de policloreto de vinila (PVC) na construção de mini-abrigos meteorológicos para aplicação em campo. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 9, 2011.

CAVALCANTI, R. S. T.; CAVALCANTI, M. L. C.; COELHO JUNIOR, L. M. C. **Manejo do solo e água com o uso da agricultura bioassalada: uma nova tecnologia para o semiárido Pernambucano**. In: Anais do III Simpósio Nacional de estudos para produção vegetal no Semiárido, 2018.

CHANG, J. **Climate and Agriculture**. 2ª Ed. Chicago: Aldine Publishing Company, 1971, 296 p.

COELHO, E. F.; SILVA, A. J. P.; PARIZOTTO, I.; SILVA, T. S. M. **Sistemas e manejo de irrigação de baixo custo para agricultura familiar**. Cruz das Almas, BA: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2014, 47 p.

COHIDRO. **Perímetro irrigado poção da Ribeira**. 2018. Disponível em: http://cohidro.se.gov.br/?page_id=55. Acesso em: novembro de 2018.

CUNHA, A. R.; MARTINS, D. Estudo comparativo entre elementos meteorológicos obtidos em estações meteorológicas convencional e automática em Botucatu, SP, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 12, n. 1, p. 103-111, 2004.

DIEGUES, A. C. Desenvolvimento Sustentável ou Sociedades Sustentáveis: Da crítica dos modelos aos novos paradigmas. In: **Ecologia Humana e Planejamento Costeiro**. 2º ed. São Paulo: NUPAUB/USP, p.39-57, 2001.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. Rome: FAO, 1977. 145 p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 24).

DORNELAS, K. D. S.; SILVA, C. L.; OLIVEIRA, C. A. S. Coeficientes médios da equação de Angström-Prescott, radiação solar e evapotranspiração de referência em Brasília. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 8, p. 1213-1219, 2006.

DUNN, W. C. **Introduction to instrumentation, sensors, and process control**. Boston: Artech House Sensors Library, 2006, 354p.

DULNIK, P. R. **Elaboração de um pluviógrafo com sensor ótico**. Dissertação de mestrado em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2006.

EMBRAPA. **Visão 2014 – 2034: o futuro do desenvolvimento tecnológico da agricultura irrigada brasileira**. Brasília-DF, 2014, 194p.

FERREIRA, C. M. **Fundamentos para a implantação e avaliação da produção sustentável de grãos**. EMBRAPA. Arroz e Feijão, 2008.

FIETZ, C. R.; FISCH, G. F. Avaliação de modelos de estimativa do saldo de radiação e do método de Priestley-Taylor para a região de Dourados, MS. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 4, p. 449-453, 2009.

FINHOLDT, G. **Desenvolvimento e avaliação de uma estação meteorológica automática para manejo de irrigação**. Dissertação de mestrado em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, 2008.

FINHOLDT, G.; MANTOVANI, E. C.; SEDIYAMA, G. C.; RAMOS, M. M.; VIEIRA, G. H. S. Desenvolvimento de uma estação meteorológica automática para manejo de irrigação. **Engenharia na agricultura**. v. 19, n. 4, p. 313-328, 2011.

FISCH, G; VENDRAME, I. F.; HANAOKA, C. M. Variabilidade espacial da chuva durante o experimento LBA/TRMM 1999 na Amazônia. **Acta Amazônica**, v. 37, n. 4, p. 583-590, 2007.

FACCIOLI, G. G. **Modelagem da uniformidade e da lâmina de irrigação na produtividade do feijoeiro**. Tese de doutorado em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, 2002.

FREIRE, L. A. D. **Desenvolvimento de um piranômetro fotovoltaico**. Dissertação de mestrado em Ciências, Universidade Federal de Pernambuco, 2008.

GIACOMELLI, W. **Automação como suporte ao manejo sustentado da irrigação na cultura da alface no município de Itabaiana-SE**. Dissertação de mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal de Sergipe, 2011.

GLIESSMAN, S. R. **Agroecologia: processos ecológicos em agricultura sustentável**. 3.ed. Porto Alegre: Ed.UFRGS, 2005.

GUEDES FILHO, D. H.; SANTOS JÚNIOR, J. A.; COSTA FILHO, J. F.; FRANCISCO, P. R. M.; CAMPOS, V. B. Estimativa da evapotranspiração de referência para a cidade de Areia, Paraíba. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 5, n. 1, p. 37-47, 2011.

GUIMARÃES, V. G.; BAUCHSPIESS, A. **Automação e monitoramento remoto de sistemas de irrigação visando a agricultura familiar**. In: Anais do XIX Congresso Brasileira de Automática, Campina Grande-PB, 2012.

IBGE, **Produção Agrícola Municipal - Lavoura Temporária - 2017 - Batata-doce - Quantidade produzida - Comparação entre os Municípios: Sergipe**. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html?edicao=22566&t=resultados>. Acesso em: novembro de 2018.

JACOBI, P. R.; GRANDISOLI, E. **Água e sustentabilidade: desafios, perspectivas e soluções**. São Paulo: IEE-USP e Reconnecta, 2017, 110p.

JESUS, D. B. M.; SOUZA, R. C. A. **Avaliação da qualidade da água do rio São Francisco na região de Bom Jesus da Lapa, BA, e as atividades antrópicas relacionadas**. In: anais do XII SEPA, Unifacs, 2013.

KUCHLER, O. A.; SILVA, A. C. T.; MODRO, N. R.; MARTIN, J. E. M. P. **Sistema para aquisição de dados pluviométricos**. In: Anais do XXX Encontro Nacional de Engenharia de Produção, São Carlos-SP, 2010.

LACERDA, C. S.; CÂNDIDO, G. A. Modelos de indicadores de sustentabilidade para gestão

de recursos hídricos. In: LIRA, W. S.; CÂNDIDO, G. A. (Org.). **Gestão sustentável dos recursos naturais: uma abordagem participativa**. Campina Grande: EDUEPB, 2013.

LEFF, E. **Saber Ambiental: Sustentabilidade, racionalidade, complexidade, poder**. Petrópolis: Vozes, 2009.

LOPES, E. S. A., MOTA, D. M. **Tecnologia e renda na agricultura familiar irrigada de Sergipe**. São Cristóvão, SE; Universidade Federal de Sergipe; Aracaju: Embrapa-CPATC, 1997, 186p.

MACEDO, A. B. M.; MIRANDA, F. R.; GOMES FILHO, R. R.; TEIXEIRA, A. S.; CAVALCANTE JUNIOR, J. A. H. ARAÚJO, H. F. Desempenho de um sistema de irrigação automatizado através da tensão de água no solo. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 4, p. 78-81, 2010.

MANTOVANI, E.C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L.F. **Irrigação: princípios e métodos**. 3. ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2012. 355p.

MANTOVANI, E. C.; DELAZARI, F. T.; DIAS, L. E; ASSIS, I. R.; VIEIRA, G. H. S.; LANDIM, F. M. Eficiência no uso da água de duas cultivares de batata-doce em resposta a diferentes lâminas de irrigação. **Horticultura Brasileira**, v. 31, n. 4, p. 602-606, 2013.

MARQUELLI, W. A. Tensiômetros para o controle de irrigação em hortaliças. **Embrapa Hortaliças. Circular Técnica**, 2008.

MARQUELLI, W. A.; SILVA, H. R.; SILVA, W. L. C. Procedimento simplificado para o manejo de água em hortaliças irrigadas por aspersão. In: TORRECILLAS, A.; PALÁCIOS, E.; VICTORIA, F. B.; PEREIRA, L. S.; GARCIA, M.; PAREDES, P. (Org.). **Tecnologias para o Uso Sustentável da Água em Regadio**. Lisboa: Edições Colibri, 2010.

MELO, A. S.; COSTA, B. C.; BRITO, M. E. B.; NETTO, A. O. A.; VIÉGAS, P. R. A.; Custo e rentabilidade na produção de batata-doce nos perímetros irrigados de Itabaiana, Sergipe. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 39, n. 2, p. 119-123, 2009.

NEVES, G. A. R. **Desenvolvimento de um sistema automatizado com sensores alternativos para coleta e armazenamento de dados micrometeorológicos**. Tese de doutorado em Física Ambiental, Universidade Federal de Mato Grosso, 2013.

NEVES, G. A. R.; MARQUES, J. B.; NOGUEIRA, J. S.; BIUDES, M. S.; ARRUDA, H. Z.; CURADO, L. F. A. PALÁCIOS, R. S. Desenvolvimento e Calibração de um Termohigrômetro para uso em Pesquisas de Micrometeorologia, Agrometeorologia e Clima. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 8, n. 1, p. 136-143, 2015.

OLIVEIRA, R. A.; TAGLIAFERRE, C.; SEDIYAMA, G. C.; MATERAM, F. J. V.; CECON, P. R. Desempenho do Irrigâmetro na estimativa da evapotranspiração de referência. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 12, n. 2, p. 166-173, 2008.

PALMIERI, A. M. **Desenvolvimento de sistema automatizado de baixo custo para coleta e armazenamento de dados de variáveis climáticas: aplicações no ambiente agrícola**. Dissertação de mestrado em Ciências, Universidade de São Paulo, 2009.

PALMIERI, A. M.; SILVEIRA, L. R.; MIRANDA, J. H.; MIRANDA, K. O. S. Sistema

automatizado de baixo custo para coleta de dados de umidade relativa do ar e temperatura do ar. **Engenharia Agrícola**, v. 34, n. 4, 2014.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002.

PINTO, J. E. S. S.; AGUIAR NETTO, A. O. **Clima, geografia e agrometeorologia: uma abordagem interdisciplinar**. São Cristóvão: Editora UFS; Aracaju, Se: Fundação Oviêdo Teixeira, 2008. 221p.

PINTO, P. R. **Sistema de automação do Irrigâmetro utilizando-se controle digital**. Tese de doutorado em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, 2008.

PIRES, D. P. L.; AFONSO, J. C.; CHAVES, F. A. B. A termometria nos séculos XIX e XX. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 28, n. 1, p. 101 - 114, 2006.

PORTILHO, F. **Sustentabilidade ambiental, consumo e cidadania**. 2º ed., São Paulo: Cortez, 2010.

QUEIROZ, T. M.; CARVALHO, J. A; RABELO, G. F. Desenvolvimento de sistema de automação da irrigação para ambiente protegido utilizando tanque de evaporação. **Revista Enciclopédia Biosfera**, v. 9, n. 16, p. 2894-2905, 2013.

REIS, R. R. S.; SIQUEIRA, V. S. S.; SOUZA, R. P.; LEITE, R. L. L. **Sistema automatizado de irrigação: uma solução de baixo custo para agricultura**. In: Anais da VI Jornada de iniciação científica e extensão, Araguatins -TO, 2015.

SACHS, I. **Caminhos para o desenvolvimento sustentável**. Rio de Janeiro: Ed. Garamond, 2002.

SAMPAIO, C. A. P.; ULLMANN, M. N.; CAMARGO M. Desenvolvimento e avaliação de anemômetro de copos de fácil construção e operação. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 14, n. 1, p.11-16, 2005.

SANCHES, R. G.; SILVA, M. S. D.; SANTOS, B. C; PEREIRA, D. N. B. Proposta de pluviômetro de baixo custo utilizando a plataforma de prototipagem Arduino. **Os desafios da geografia física na fronteira do conhecimento**. v. 1, 2017.

SANTOS, R. A.; HERNANDEZ, F. B.T.; FERREIRA, E. J. S.; VANZELA, L. S.; LIMA R. C. **Uniformidade de distribuição de água em irrigação por gotejamento em sub-superfície instalado na cultura de pupunheira (Bactris gasipaes H. B. K.)**. In: Anais do XXXII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, Goiânia-GO, 2003.

SANTOS, J. M. C. **Sistema de controle de irrigação baseado em linguagem Java**. Dissertação de mestrado em Engenharia Eletrônica e Telecomunicações, Universidade de Aveiro, 2009.

SANTOS, C. O. Questões socioambientais nos perímetros irrigados do município de Itabaiana/SE. **Acta Geográfica**, v. 7, n. 14, p. 139-152, 2013.

SANTOS, M. R. A.; SANTOS, K. V.; SANTOS, I. L. N.; GOMES FILHO, R.R.; CARVALHO, C. M.; BATISTA, L. S. **Análise da condutividade hidráulica em um**

argissolo vermelho amarelo no cultivo de milho e cobertura de girassol. In: Anais do XXV CONIRD – Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem, São Cristóvão - SE, 2015.

SILVA, K. O. **Desenvolvimento de sistema automatizado de baixo custo para aquisição de dados de umidade relativa e temperatura do ar.** Dissertação de mestrado em Física do Ambiente Agrícola, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 2000.

SILVA, R. M.A. **Entre o combate à seca e a convivência com o semiárido: transições paradigmáticas e sustentabilidade do desenvolvimento.** Tese de doutorado em desenvolvimento sustentável, Universidade de Brasília, 2006.

SILVA, C. R.; SILVA, V. J.; ALVES JUNIOR, J. CARVALHO, H. P. Radiação solar estimada com base na temperatura do ar para três regiões de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 3, p. 281-288, 2012.

SILVA, V. P.; TAVARES, A. L.; SOUSA, I. F. Evapotranspiração e coeficientes de cultivo simples e dual do coentro. **Horticultura Brasileira**, v. 31, n. 2, 2013.

SILVA, P. S. O. **Avaliação da sustentabilidade do Perímetro Irrigado Porção da Ribeira em Itabaiana, Sergipe.** Dissertação de mestrado em Recursos Hídricos, Universidade Federal de Sergipe, 2016.

SIMONI, F.; TADDEI, C.; OLIVEIRA, A. C.; LOPES, W. A. P.; FELICIANO, C.; FERRANTE, V. L. S. B. **Diagnóstico de experiências de capacitação e extensão rural agroecológicas no assentamento Bela Vista.** In: anais do VII Simpósio sobre reforma agrária e questões rurais, 2016.

SOUZA, R. O. R. M. **Desenvolvimento e avaliação de um sistema de irrigação automatizado para áreas experimentais.** Dissertação de mestrado em Agronomia, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 2001.

SOUZA, I. F.; SILVA, B. B. Monitoramento do tempo para cálculo da evapotranspiração. In: AGUIAR NETO, A. O.; BASTOS, E. A. (Org.). **Princípios agrônômicos da Irrigação.** Brasília, DF: Embrapa, 2013.

SUGAWARA, M. T. **Estudo de sensores de baixo custo para estação meteorológica automática.** Tese de doutorado em Meteorologia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, 2003.

TAGLIAFERRE, C.; SANTOS, L. C.; SANTOS NETO, I. J.; SANTOS, T. J. ROCHA, F. A.; GUIMARÃES, D. U. Estimativa da evapotranspiração de referência com uso do irrigâmetro em Vitória da Conquista/BA. **Irriga**, v. 17, n. 1, p. 28-38, 2012.

TEIXEIRA, G. C. S.; BELTRÃO, D. S.; EVANGELISTA, A. W. P. Estudos de evapotranspiração em casa de vegetação. **Revista Enciclopédia Biosfera**, v. 7, n. 13, p. 520-530, 2011.

TERUEL, B. J. Controle automatizado de casas de vegetação: variáveis climáticas e fertirrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 3, p. 237-245, 2010.

TUBELIS, A.; NASCIMENTO, F. J. L. **Meteorologia descritiva: fundamentos e aplicações brasileiras**. São Paulo: Nobel - MBA - Livraria, Papelaria e Distribuidora de Livros, 1992. 374 p.

TUNDISI, J. G. Recursos Hídricos. **Revista MultiCiência**, v. 1, n. 1, 2003.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia**. Versão Digital 2, Recife, 2006. Disponível em:

http://www.icat.ufal.br/laboratorio/clima/data/uploads/pdf/METEOROLOGIA_E_CLIMATOLOGIA_VD2_Mar_2006.pdf. Acesso em: novembro de 2018.

VARGAS, E. V. Água e relações internacionais. **Revista brasileira de política internacional**, v. 43, n. 1, p. 178-182, 2000.

VIRGENS FILHO, J. S.; OLIVEIRA, R. B.; LEITE, M. L; TSUKAHARA, R. Y. Desempenho dos modelos CLIGEN, LARS-WG e PGECLIMA_R na simulação de séries diárias de temperatura máxima do ar para localidades do estado do paraná. **Revista Engenharia Agrícola**, v. 33, n. 3, p. 538-547, 2013.

VOLTAN, D. S. **Desenvolvimento de um sistema computacional para monitoramento de parâmetros físicos na área de irrigação, com base na plataforma LabView**. Dissertação de mestrado em agronomia, Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, 2012.

WAGNER, N. L. Desenvolvimento e Sustentabilidade Espacial. In: ARAÚJO, L. M. (org.). **Geografia: Espaço, Tempo e Planejamento**. Maceió: EDUFAL, p. 133-146, 2004.

WMO. **Guide to meteorological instruments and methods of observation**. Geneva, 2008. Disponível em: https://library.wmo.int/pmb_ged/wmo_8_en-2012.pdf. Acesso em novembro de 2018.

WWAP. **Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2015**. Água para um mundo sustentável: Sumário Executivo.

**APÊNDICE A – ROTINA COMPUTACIONAL PARA ESTIMATIVA DA
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA, DEFINIÇÃO DO COEFICIENTE DA
CULTURA, CÁLCULO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CULTURA E TEMPO DE
IRRIGAÇÃO**

```
<?php
$data=$_GET['data'];
$data_timestamp=strtotime($data);
$data_timestamp=strtotime("-1 day",$data_timestamp);
$data=date('Y-m-d',$data_timestamp);
$con=mysqli_connect("127.0.0.1","root","");
$db=mysqli_select_db($con,"doutorado");
$sql = "select z, cp, latitude, data_inicio, periodo_1, kc_1, periodo_2, kc_2, periodo_3,
kc_3, periodo_4, kc_4 from plantio, kc_cultura where data_inicio<='$data' and data_fim >=
'$data' and plantio.cultura=kc_cultura.id";
$query=mysqli_query($con,$sql);
$linha = mysqli_fetch_array($query);
$z = $linha['z'];
$cp = $linha['cp'];
$latitude = $linha['latitude'];
$data_inicio = $linha['data_inicio'];
$periodo1 = $linha['periodo_1'];
$kc1 = $linha['kc_1'];
$periodo2 = $linha['periodo_2'];
$kc2 = $linha['kc_2'];
$periodo3 = $linha['periodo_3'];
$kc3 = $linha['kc_3'];
$periodo4 = $linha['periodo_4'];
$kc4 = $linha['kc_4'];
$data_inicio_timestamp=strtotime($data_inicio);
$dias_plantio=$data_timestamp-$data_inicio_timestamp;
$dias_plantio=$dias_plantio / (60 * 60 * 24);
if ($dias_plantio<=$periodo1)
    $kc=$kc1;
else if ($dias_plantio>$periodo1 && $dias_plantio<=($periodo2+$periodo1))
    $kc=$kc1+((($dias_plantio-$periodo1)*$kc2);
else if ($dias_plantio>($periodo2+$periodo1) && $dias_plantio <=
($periodo3+$periodo2+$periodo1))
    $kc=$kc3;
else if ($dias_plantio>($periodo3+$periodo2+$periodo1) &&
$dias_plantio<=($periodo4+$periodo3+$periodo2+$periodo1))
    $kc=$kc3-((($dias_plantio-$periodo1-$periodo2-$periodo3)*$kc4);
$sql = "SELECT MAX(temperatura)as tmax, MIN(temperatura)as tmin, MAX(umidade) as
umax, MIN(umidade) as umin, AVG(vento)as u2, sum(chuva) as chuva from dados
WHERE data='$data'";
$query=mysqli_query($con,$sql);
$linha = mysqli_fetch_array($query);
$tmax = $linha['tmax'];
$tmax = ($tmax+1.4174)/1.0908;
```

```

$tmin = $linha['tmin'];
$tmin = ($tmin+1.4174)/1.0908;
$RHmaximo = $linha['umax'];
$RHmaximo = ($RHmaximo-2.95)/0.9139;
$RHminimo = $linha['umin'];
$RHminimo = ($RHminimo-2.95)/0.9139;
$u2= $linha['u2'];
$u2= ($u2-63.291)/15.205;
$u2= $u2/3.6;
$chuva=$linha['chuva']/2;
$volume=7.08*$chuva;
$chuva=(10*$volume)/283.5;
$sql ="SELECT avg(radiacao) as rad FROM dados where data='$data' and extract(hour
FROM hora)>= 5 and extract(hour FROM hora)<18 GROUP BY extract(hour FROM hora)
order by hora";
$query=mysqli_query($con,$sql);
$rs=0;
while($linha = mysqli_fetch_array($query))
{
    $rs = $rs + (($linha['rad']+13.164)/1.0769)*0.0036;
}
$rs=$rs*1.6;
$PI=3.141592;
$tmedia=($tmax+$tmin)/2;
function diajuliano($data)
{
    $partes = explode("-", $data);
    $dia = $partes[2];
    $mes = $partes[1];
    $janeiro=31;
    $fevereiro= 28;
    $marco= 31;
    $abril= 30;
    $maio= 31;
    $junho= 30;
    $julho= 31;
    $agosto= 31;
    $setembro= 30;
    $outubro= 31;
    $novembro= 30;
    $dezembro= 31;
    switch ($mes)
    {
        case 1:
            $diaJ=$dia;
            break;
        case 2:
            $diaJ=$janeiro+$dia;
            break;
        case 3:

```

```

$diaJ=$janeiro+$fevereiro+$dia;
break;
case 4:
$diaJ=$janeiro+$fevereiro+$marco+$dia;
break;
case 5:
$diaJ=$janeiro+$fevereiro+$marco+$abril+$dia;
break;
case 6:
$diaJ=$janeiro+$fevereiro+$marco+$abril+$maio+$dia;
break;
case 7:
$diaJ=$janeiro+$fevereiro+$marco+$abril+$maio+$junho+$dia;
break;
case 8:
$diaJ=$janeiro+$fevereiro+$marco+$abril+$maio+$junho+$julho+$dia;
break;
case 9:
$diaJ=$janeiro+$fevereiro+$marco+$abril+$maio+$junho+$julho+$agosto+$dia;
break;
case 10:
$diaJ=$janeiro+ $fevereiro+ $marco+ $abril+ $maio+ $junho+ $julho+ $agosto+
$setembro+ $dia;
break;
case 11:
$diaJ=$janeiro+ $fevereiro+ $marco+ $abril+ $maio+ $junho+ $julho+
$agosto+ $setembro+ $outubro+ $dia;
break;
case 12:
$diaJ=$janeiro+ $fevereiro+ $marco+ $abril+ $maio+ $junho+ $julho+ $agosto+
$setembro+ $outubro+ $novembro+ $dia;
break;
}
return $diaJ;
}

```

```

$esmaximo=0.6108* exp((17.27*$tmax)/($tmax+237.3));
$esminimo=0.6108* exp((17.27*$tmin)/($tmin+237.3));
$es= ($esmaximo + $esminimo)/2;
$ea=(( $esminimo * $RHmaximo/100) + ($esmaximo * $RHminimo/100))/2;
$de=$es-$ea;
$j=diajuliano($data);
$dr=1+0.033*cos(2*$PI/365*$j);
$ds = 0.409*sin(2*$PI/365*$j-1.39);
$ws= acos(-tan($latitude)*tan($ds));
$ra= 24*60/$PI*0.082*$dr*($ws*sin($latitude)* sin($ds)+cos($latitude)* cos($ds) *
sin($ws));
$rso=(0.75+ 0.00002*$z)*$ra;
$rns=(1-0.23)*$rs;
$tmaxk=$tmax+273.16;

```

```

$tmink=$tmin+273.16;
$rn1=4.903*pow(10,-9)*((pow($tmaxk,4)+pow($tmink,4))/2)*(0.34-0.14*sqrt($ea))*
(1.35*$rs/$rso-0.35);
$rn=$rns-$rn1;
$delta = (4098*(0.6108*exp((17.27*$tmedia)/($tmedia+237.3)))) /
(pow($tmedia+237.3,2));
$a=0.408*$delta*($rn-0);
$b=$cp*(900/($tmedia+273))*$u2*($es-$ea);
$c=$delta+$cp*(1+0.34*$u2);
$eto=($a+$b)/$c;
$etc=$eto*$kc;
$etc=$etc-$chuva;
if ($etc>0)
{
    $vazao=96;
    $raio=3.5;
    $area=$PI*pow($raio,2);
    $LA=$vazao/$area;
    $LB=$etc/0.8;
    $tempo=$LB/$LA;
    $tempo=$tempo*60;
    $tempo=$tempo+1;
}
else
{
    $tempo=0;
}
echo $tempo;
echo "*";
$sql ="INSERT INTO irrigacao (data, et0, etc, tempo, kc, tmax,tmin,umax,umin, u2, rs,
chuva) VALUES ('$data',$eto,$etc,$tempo,$kc,$tmax,$tmin,$RHmaximo, $RHminimo,
$u2,$rs,$chuva)";
$query=mysqli_query($con,$sql);
mysqli_close($con);
?>

```

APÊNDICE B – ROTINA COMPUTACIONAL PARA LEITURA DAS VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS E GERENCIAMENTO DO SISTEMA DE IRRIGAÇÃO.

```
#include "Wire.h"
#include "DS3231.h"
#include <SPI.h>
#include <Ethernet.h>
#include "SHT2x.h"
#include <LiquidCrystal.h>
byte mac[] = { 0xAB, 0xCD, 0x12, 0x34, 0xFF, 0xCA };
IPAddress server(192,168,1,120);
IPAddress ip(192,168,1,150);
IPAddress gateway(192,168,1,120);
IPAddress subnet(255,255,255,0);
EthernetClient client;
DS3231 clock;
RTCDateTime dt;
String data,hora;
int contador;
int contador2;
long tempo_atual,tempo_anterior,tempo;
long tempo_atual2,tempo_anterior2,tempo2;
float umi,temp,tempinterna;
int radiacao;
int pinoRele=7;
int pinoLed=5;
int hora_ligar=9;
int hora_ligar_tarde=14;
int hora_inicio_irrigacao;
String tempo_char, hora_char,minuto_char;
int Tempo,Hora,Minuto;
boolean rele_ligado,led_ligado;
void efeito_hall()
{
    tempo_atual=millis();
    tempo=abs(tempo_atual-tempo_anterior);
    if(tempo>=30)
    {
        tempo_anterior=tempo_atual;
        contador++;
    }
}
void efeito_hall2()
{
    tempo_atual2=millis();
    tempo2=abs(tempo_atual2-tempo_anterior2);
    if(tempo2>=30)
    {
        tempo_anterior2=tempo_atual2;
        contador2++;
    }
}
```

```

    }
}
void exibe_lcd()
{
    lcd.begin(16, 2);
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("T=");
    lcd.print(temp);
    lcd.print(" ");
    lcd.print("U=");
    lcd.print(umi);
    lcd.print(" ");
    lcd.print("Ti=");
    lcd.print(tempinterna);
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("R=");
    lcd.print(radiacao);
    lcd.print(" ");
    lcd.print("V=");
    lcd.print(contador);
    lcd.print(" ");
    lcd.print("C=");
    lcd.print(contador2);
}
void leitura_dados()
{
    Ethernet.begin(mac,ip,gateway,subnet);
    dt = clock.getDateTime();
    data=clock.dateFormat("Y-m-d", dt);
    hora=clock.dateFormat("H:i", dt);
    if (client.connect(server, 80))
    {
        client.print("GET /inserir.php?temp=");
        umi = SHT2x.GetHumidity();
        temp = SHT2x.GetTemperature();
        tempinterna=clock.readTemperature();
        radiacao=analogRead(3);
        client.print(temp);
        client.print("&umi=");
        client.print(umi);
        client.print("&vento=");
        client.print(contador);
        client.print("&chuva=");
        client.print(contador2);
        client.print("&radiacao=");
        client.print(radiacao);
        client.print("&data=");
        client.print(data);
        client.print("&hora=");
    }
}

```



```

    client.print(hora);
    client.print("&tempinterna=");
    client.println(tempinterna);
    client.println("Host: http://192.168.1.120");
    client.println("Connection: close");
    exhibe_lcd();
    led_ligado=!led_ligado;
    digitalWrite(pinoLed, led_ligado);
    contador=0;
    contador2=0;
}
else
{
    Serial.println("Falha na conexão");
}
client.stop();
}

void calcula_irrigacao()
{
    Ethernet.begin(mac,ip,gateway,subnet);
    tempo_char="";
    if (client.connect(server, 80))
    {
        client.print("GET /irriga.php?data=");
        dt = clock.getDateTime();
        data=clock.dateFormat("Y-m-d", dt);
        client.println(data);
        client.println("Host: http://192.168.1.120");
        while (!client.available())
        {
        }
        while (client.available())
        {
            char c = client.read();
            if (c=='*')
                break;
            tempo_char=tempo_char+c;
        }
        Tempo=tempo_char.toInt();
    }
    else
    {
        Serial.println("Falha na conexão");
    }
    client.stop();
}

```

```

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  Ethernet.begin(mac,ip,gateway,subnet);
  pinMode(pinoRele, OUTPUT);
  digitalWrite(pinoRele, HIGH);
  rele_ligado=false;
  pinMode(pinoLed, OUTPUT);
  led_ligado=false;
  digitalWrite(pinoLed, led_ligado);
  clock.begin();
  clock.armAlarm1(false);
  clock.armAlarm2(false);
  clock.clearAlarm1();
  clock.clearAlarm2();
  clock.setAlarm1(0, 0, 0, 20, DS3231_MATCH_S);
  clock.setAlarm2(0, 0, 0, DS3231_MATCH_M);
  attachInterrupt(0,efeito_hall,FALLING);
  contador=0;
  tempo_anterior=0;
  attachInterrupt(1,efeito_hall2,FALLING);
  contador2=0;
  tempo_anterior2=0;
}

void loop()
{
  if (clock.isAlarm1())
  {
    leitura_dados();

    if (rele_ligado==true)
    {
      dt = clock.getDateTime();
      minuto_char = (clock.dateFormat("i", dt));
      Minuto=minuto_char.toInt();
      hora_char =(clock.dateFormat("H", dt));
      Hora=hora_char.toInt();
      int tempo_corrido=(Hora-hora_inicio_irrigacao)*60+Minuto;
      if (tempo_corrido>=Tempo)
      {
        rele_ligado=false;
        digitalWrite(pinoRele, HIGH);
      }
    }
  }
}

```

```
if (clock.isAlarm2())
{
    dt = clock.getDateTime();
    hora_char =(clock.dateFormat("H", dt));
    Hora=hora_char.toInt();
    if ((Hora==hora_ligar) || (Hora==hora_ligar_tarde))
    {
        calcula_irrigacao();
        if (Tempo>0)
        {
            Tempo=(Tempo/2)+1;
            rele_ligado= true;
            digitalWrite(pinoRele, LOW);
            hora_inicio_irrigacao=Hora;
        }
    }
}
```

APÊNDICE C – ROTINA COMPUTACIONAL PARA GRAVAÇÃO DOS DADOS METEOROLÓGICOS NA BASE DE DADOS.

```
<?php
    $temperatura=$_GET['temp'];
    $umidade=$_GET['umi'];
    $radiacao=$_GET['radiacao'];
    $chuva=$_GET['chuva'];
    $vento=$_GET['vento'];
    $tempinterna=$_GET['tempinterna'];
    $hora=$_GET['hora'];
    $data=$_GET['data'];
    $con=mysqli_connect("localhost","root","");
    $db=mysqli_select_db($con,"doutorado");
    $sql = "insert into dados(temperatura,umidade,vento,radiacao,chuva,tempinterna,data,hora)
    values ($temperatura,$umidade,$vento,$radiacao,$chuva,$tempinterna,$data,$hora)";
    $query=mysqli_query($con,$sql);
    mysqli_close($con);
?>
```

APÊNDICE D – CORTES DO ANEMÔMETRO CONFECCIONADO